

鋼床版垂直スティブナ上端溶接部に生じる疲労き裂の発生・進展性状と補修方法に関する研究

著者	大住 圭太
著者別名	OSUMI Keita
ページ	1-90
発行年	2017-03-24
学位授与番号	32675甲第400号
学位授与年月日	2017-03-24
学位名	博士(工学)
学位授与機関	法政大学 (Hosei University)
URL	http://hdl.handle.net/10114/13280

法政大学審査学位論文

鋼床版垂直スチフナ上端溶接部に生じる疲労き裂の
発生・進展性状と補修方法に関する研究

大住 圭太

目 次

第 1 章 序論

1.1 研究の背景.....	1
1.2 既往の研究.....	3
1.3 研究の目的と論文構成.....	11

第 2 章 疲労き裂の発生起点と進展挙動の検討

2.1 はじめに.....	16
2.2 試験体.....	18
2.3 疲労試験.....	20
2.3.1 試験方法と試験条件.....	20
2.3.2 溶接のままの試験体の疲労試験結果.....	20
2.3.3 止端を仕上げた試験体の疲労試験結果.....	23
2.3.4 溶接部を切削した試験体の疲労試験結果.....	25
2.4 試験体の応力解析.....	27
2.5 溶接サイズとギャップがルート部応力に及ぼす影響.....	30
2.6 き裂深さとひずみ範囲減少率の関係.....	30
2.7 有効切欠き応力を用いた疲労破壊起点の検討.....	32
2.8 まとめ.....	34

第 3 章 溶接止端に留まるき裂に対する UIT の効果

3.1 はじめに.....	36
3.2 試験体.....	37
3.3 疲労試験.....	37
3.3.1 疲労試験の方法.....	37
3.3.2 疲労試験結果.....	40
3.4 UIT によるデッキ側止端き裂の閉口状態.....	44
3.4.1 き裂表面の閉口状態の観察.....	44
3.4.2 荷重－ひずみ曲線によるき裂の開閉口挙動の検討.....	45
3.4.3 UIT の打撃深さによる開閉口状態の変化の検討.....	47
3.5 UIT によるき裂進展の抑制効果の検討.....	50
3.6 ルートき裂が発生・進展した原因の検討.....	52
3.7 UIT で導入された圧縮残留応力の測定.....	53
3.8 まとめ.....	54

第4章 デッキプレート母材に進展したき裂に対するストップホールの効果

4.1	はじめに	56
4.2	疲労試験	56
4.2.1	試験体	56
4.2.2	疲労試験の方法	56
4.2.3	疲労試験結果	58
4.3	試験体の応力解析	61
4.3.1	解析における疲労破面の接触条件の検討	61
4.3.2	ストップホール壁応力に対する面取りサイズとストップホール径の影響	63
4.3.3	ストップホールの設置がき裂の発生・進展に及ぼす影響	65
4.3.4	垂直スティフナ側止端からのき裂の発生・進展の原因	66
4.4	疲労耐久性評価のための疲労強度曲線	67
4.4.1	検討方法	67
4.4.2	疲労耐久性評価と基準疲労強度曲線の提案	68
4.5	まとめ	69

第5章 実橋への適用性の検討

5.1	はじめに	71
5.2	試験体における実橋の再現性の検討	71
5.2.1	対象橋梁の構造概要と損傷発生状況	71
5.2.2	実橋の解析モデル	74
5.2.3	実橋モデルの応力解析結果	76
5.2.4	実橋と試験体の応力解析結果の比較	78
5.3	疲労き裂の補修方法と補修個所の選定方法の提案	80
5.3.1	現状の調査方法と補修方法	80
5.3.2	新たに提案する補修方法と補修個所の選定方法	81
5.3.3	UITの施工手順と施工管理方法	82
5.3.4	ストップホールの施工手順と補修管理方法	83
5.4	まとめ	85

第6章	結論	87
-----	----	----

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

道路橋の維持管理は、近年発生したいくつかの重大損傷[1]を契機に、社会の関心が高まっている分野である。2006 年 10 月に国道 25 号山添橋で鋼桁に 1m を超えるき裂が発見され、2007 年 6 月には国道 23 号木曽川大橋、同年 8 月には国道 7 号本荘大橋でそれぞれトラス橋の斜材に破断が発見された。米国でも 2007 年 8 月 1 日にミネソタ州ミネアポリスのインターステートハイウェイにおいてトラス橋崩落事故が発生した。国土交通省は道路橋予防保全に向けた有識者会議（2007 年 10 月～2008 年 5 月）により、早期発見・早期対策による予防保全の実現に関する提言[2]をまとめた。しかし、2012 年 12 月 2 日に発生した中央自動車道笹子トンネルの天井板落下事故を防ぐことはできなかった。この事態を重く受け止めた国は、2013 年を社会資本メンテナンス元年[3]と位置づけて、改めてインフラの長寿命化に関する取り組み[4,5]を進めており、各道路管理者は点検未実施個所の解消や重大損傷部の早期補修等が求められている。

2013 年頃より、各道路管理者から顕在化する道路構造物の老朽化や劣化に対する修繕・更新計画が発表されている。東・中・西日本高速道路[6]、首都高速道路[7]、阪神高速道路[8]は、鋼桁橋や鋼床版橋に生じている多数の疲労き裂を問題視しており、更新や修繕の対象に位置付けている。特に、首都高速道路神奈川 1 号横羽線の大師橋や阪神高速道路 3 号神戸線の湊川付近は、鋼床版に多数の疲労き裂が生じていることを理由に大規模更新の対象とされている。

構造物の高齢化と適切な点検の実施により、対策を実施すべき損傷個所は今後一層増加すると考えられるが、大規模な更新や修繕を実施するには莫大な予算が必要となる。少子高齢化や人口減少という問題を抱える我が国において、膨大な数の構造物をいかに効率的に維持管理していくかは重要な課題である。

鋼道路橋の床版は、鉄筋コンクリート床版、プレストレストコンクリート床版、鋼・コンクリート合成床版、鋼床版に大別される。国内の一般的な鋼床版は、厚さ 12mm 以上のデッキプレート（以下、デッキ）の下面を縦リブと横リブで補剛した構造であり、コンクリートを用いた床版に比べて軽量である。そのため、長大橋での採用実績が多く、耐震性の向上にも繋がることから、軟弱地盤の都市地域などで数多く採用されている。また、コンクリート工事のように打設・養生が不要なため、周辺環境に制約を受ける場合（例えば交差点立体化のように長時間規制が困難など）にも適用されている。その他にも、桁高が低減されることでスレンダーな構造となり美観が向上する、複雑な線形に対応しやすい、維持管理においてコンクリート床版のような剥落の恐れがないという利点がある。損傷に対する補修補強においても、部材の添接や取り換えがしやすいといった利点がある。しかし、比較的薄い鋼板を溶接で組み合わせた構造であるため、製作に手間がかかる、溶接により欠陥や変形が生じる場合がある、各部に生じる応力が複雑になる等の問題がある。

国内の鋼床版は、1945 年に東京都の中里跨線橋[9]に始めて使用されて以降、橋梁の

大規模化・長大化を背景に、死荷重の軽減が求められる橋梁を中心に採用数が増加した[10,11]。建設当初は縦リブに逆 T、バルブプレート、山形鋼、平鋼を用いた開断面リブが使用されていたが、1970 年代に入るとUリブ（トラフリブ）、Vリブ、Yリブといった閉断面リブを用いた鋼床版が建設され、それらの中でもUリブが多くの橋梁に使用されていった。例えば、本州四国連絡橋のほとんどの鋼床版が使用されており、都市内高速道路でも多く使用されている。2010 年に土木学会より発行された「鋼床版の疲労」[12]に、国内の高速道路会社 7 社における鋼床版の施工実績と採用区間を示した鋼床版マップが示されている。それによると、7 社の総延長は 285.9km（開断面 83.2km，閉断面 202.7km）で、径間数は 3926（開断面 1438，閉断面 2488）にも及んでいる。

鋼橋の疲労は活荷重比率の大きい鉄道橋の設計では考慮されていたものの、道路橋においては考慮されていなかったが、大型車（過積載車）通行量の増加などの影響により疲労き裂が顕在化したことから、平成 14 年に日本道路協会より発行された「道路橋示方書」[13]および「鋼道路橋の疲労設計指針」[14]において、疲労照査が導入された。しかし、鋼床版は輪荷重を直接支えて主構造に力を伝える役割を持つため、疲労損傷が発生しやすいと考えられていたことから、それ以前の道路橋示方書において既に疲労に対する許容応力度が規定されていた[12]。それにも係らず、鋼床版に多数の疲労き裂が発生したため、「鋼道路橋の疲労設計指針」では疲労き裂を防ぐための構造詳細が示されている。

鋼床版に生じる疲労損傷は 1980 年代から、交通量が多く大型車混入率の高い路線で報告されはじめ、今では膨大な数が発見されている。「鋼床版の疲労」[12]では首都高速道路と阪神高速道路における疲労き裂の損傷数が示されており、開断面リブを有する鋼床版で約 3500 件、閉断面リブを有する鋼床版で約 7000 件の合計 10500 件のき裂が発生していると報告されている。なお、首都高速道路と阪神高速道路は特に厳しい交通環境下にあり、他機関に比べて損傷数が多いと考えられるが、その他の機関が管理する鋼床版においても、繰返し荷重が蓄積されれば損傷数が増大するものと考えられる。

鋼床版の構造と疲労損傷事例を図 1-1 に示す。前述の通り、鋼床版はデッキとその下面を補剛する縦リブ、横リブから構成されている。デッキの上面に敷設した舗装の上を輪荷重が走行するため、デッキが局部的に変形する輪荷重走行位置近傍で疲労き裂が発生しやすい。鋼床版の疲労き裂の中でも特に発生数の多いき裂に垂直スチフナ上端のまわし溶接部（図 1-1 中の③）がある。先に挙げた首都高速道路と阪神高速道路で発見されている約 10500 件の疲労き裂のおよそ 25%はこの部位に生じているとされており、縦リブと横リブの溶接部（スリット部）（図 1-1 中の②）に次いで多く発生している。垂直スチフナは水平スチフナとともに主桁ウェブの座屈を防止するために取り付けられる部材であり、垂直スチフナと圧縮フランジを溶接で接合するのが標準的な構造である[15]。垂直スチフナの近傍に輪荷重が載荷されると、垂直スチフナがデッキの面外変形を拘束するため、上端溶接部に高い圧縮応力が繰返し

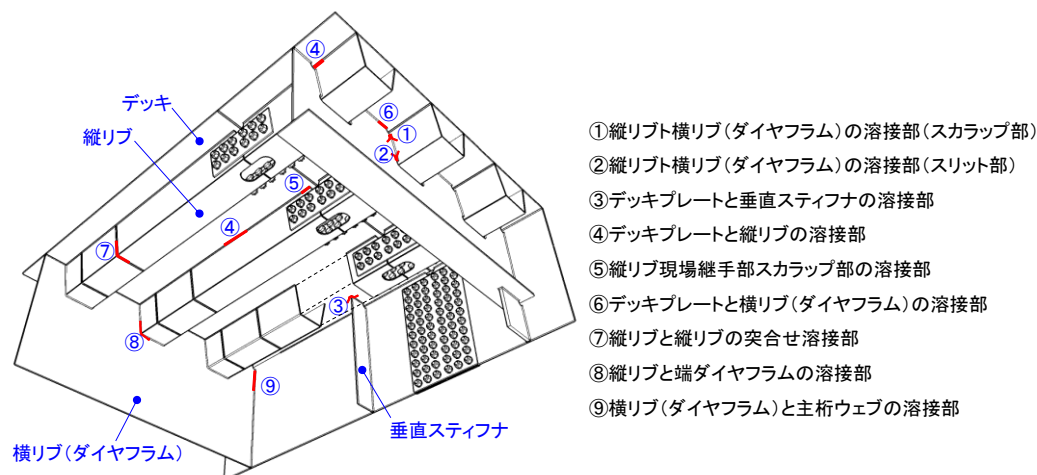


図 1-1 鋼床版の構造と疲労損傷事例

生じて疲労き裂が発生する。そのため、橋梁断面に対するレーンマーク位置が一定で、輪荷重が常に垂直スティフナの直上近傍を走行するような橋梁において、同一線上にある多数の垂直スティフナに疲労き裂が生じている[16]。垂直スティフナ上端溶接部に発生するき裂はいずれデッキを貫通し、放置してき裂が長くなると、舗装の劣化[17]だけではなく路面の陥没に繋がる可能性がある。したがって、膨大な数の垂直スティフナ上端溶接部の疲労き裂に対していかに効率的な対策を講じていくかは重要な課題である。

1.2 既往の研究

1.2.1 き裂の発生・進展性状の検討

鋼床版の垂直スティフナ上端溶接部のき裂の発生事例について、これまでにいくつか報告されている[18-24]。疲労き裂の発生起点と進展性状を図 1-2 に示す。それらの報告によれば、き裂の発生起点は回し溶接部のデッキ側止端、スティフナ側止端、ルート部の3箇所で大別され、進展性状は以下に示す4タイプに分類される。なお、4タイプの中でも図 1-3 に示すタイプ1とタイプ2のき裂が数多く報告されている。

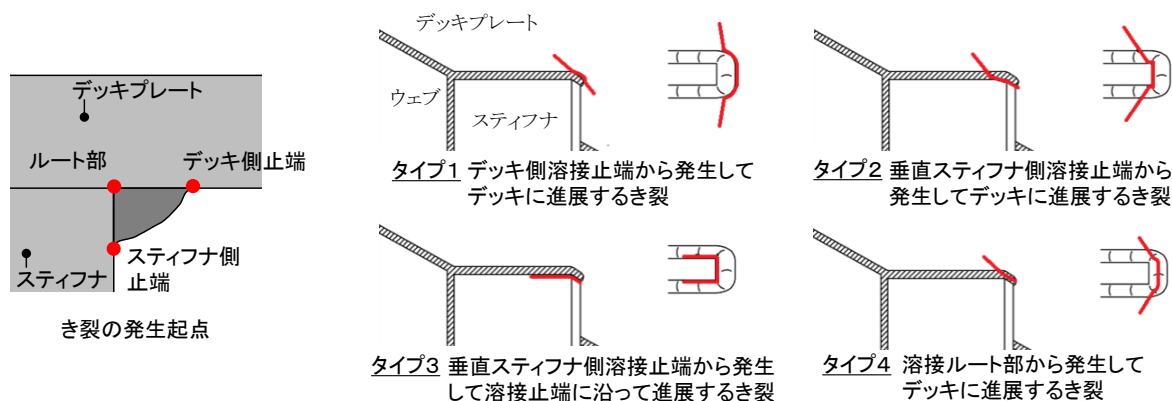
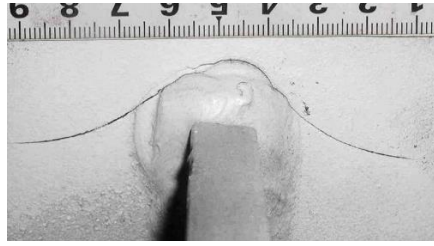
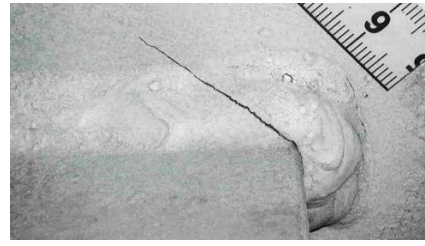


図 1-2 疲労き裂の発生起点と進展性状



(a) タイプ 1



(b) タイプ 2

図 1-3 垂直スティフナのき裂の発生状況例

疲労き裂の発生起点や進展性状には、载荷位置、構造ディテール、溶接の形状・寸法やルートギャップ等が影響すると考えられる。実橋や実大試験体の応力測定から载荷位置の影響に対する検討が行われており[25-27]、輪荷重が縦リブ直上付近に位置する場合にはデッキ側溶接止端に、スティフナ直上付近に位置する場合にはスティフナ側溶接止端に高い応力集中が生じることが示されている。森ら[28]は、垂直スティフナ上端部を模擬した小型試験体による疲労試験を行い、すでにタイプ 1 とタイプ 3 のき裂を再現している。そして、タイプ 1 のき裂は繰返し荷重载荷直後に生じて急速に進展するが、ある程度の長さには達すると遅延し、デッキ上面から新たにき裂が発生すること、その後それらのき裂が合体してある程度長くなると、き裂の進展は遅くなり、ほぼ停留することを確かめている。また、タイプ 3 の疲労き裂も、繰返し荷重载荷直後に発生して急速に進展するが、き裂長さがある程度以上になると停留するとしている。しかし、これらの結果は表面で観察されたき裂の進展性状であり、深さ方向のき裂進展性状は明らかにされていない。また、タイプ 2 と 4 のき裂については再現されていない。タイプ 2 のき裂を再現した疲労試験結果[29,30]も報告されているが、き裂の発生起点が変化する原因について詳細な検討は行われていない。補修方法を検討する上でき裂の発生・進展性状を明らかにすることは不可欠であり、更なる検討が必要と考えられる。

1.2.2 補修補強方法の検討

(1) 補修補強方法の概要

垂直スティフナ上端溶接部の疲労き裂は、その直上近傍を輪荷重が走行することにより生じるデッキの変形をスティフナが拘束し、局部的に高い応力が生じるために発生するとされている[12,16]。なお、圧縮応力によっても疲労き裂が発生・進展するのは、溶接による引張残留応力に原因があるものと考えられている。古くから発生しているき裂であることから、補修補強に関しては、これまでに多くの適用事例や検討事例が報告されている。それらの補修補強方法は大きく以下の 3 種類に分けられる。

- ①デッキの変形を抑制するための補強部材の設置
- ②垂直スティフナによるデッキの拘束を和らげるための構造ディテールの改良
- ③その他のき裂補修

(2)補強部材の設置

補強部材を設置する方法には，デッキの上面からの施工を伴うものとデッキの下面からのみで施工できるものがある．

文献[31]では，図 1-4 に示すように垂直スチーフナ周辺のデッキの上下面に添設板を設置して皿ボルトで固定する方法を提案し，その効果について小型試験体の疲労試験を行い検討している．なお，下面側の当て板には，垂直スチーフナを避けるためのスリットが設けられている．デッキを貫通したき裂に対して当て板を行い繰返し荷重を載荷したところ，回し溶接部から発生したき裂の進展は停留したが，新たにスチーフナ側面の溶接止端部にき裂が生じ，スリットを設けたことで，スリット範囲に応力が集中したと推察している．文献[24]では同様の構造を実橋に適用した事例が紹介されている．デッキ上面作業を伴う方法のため舗装の撤去や交通規制が必要で，時間とコストを要することから，デッキ下面からの作業のみで施工できる方法が望ましいと指摘している．



図 1-4 デッキ上下面への当て板補強[24]

デッキ下面からの作業のみで補強を行った事例も報告されている．文献[32]では，図 1-5 に示すように，スチーフナ上端部をガス切断した上で，水平プレートに鉛直プレートを溶接で取り付けた T 形補強材を設置する方法を実橋に適用した事例が報告されている．T 形補強材はデッキとは溶接で，スチーフナとはボルトで接合しており，き裂に対しては，その深さが 6mm 以上ではストップホール，6mm 未満ではガウジングと再溶接で補修している．平成 3 年に補強が行われたが，11 年後である平成 14 年の点検で T 形補強材の水平プレートと鉛直プレートの溶接止端に疲労き裂が発見されている[21]．同様の補強構造について実物大モデルを用いた疲労試験も行われており，そこでは溶接接合に加えて接着剤接合についても検討されている [33,34]．両接合方法とも現行構造と比べて疲労寿命は増加したが，溶接接合では T 形補強材とデッキの溶接部にき裂が生じ，接着剤接合では接着剤に剥離が生じたとされており，デッキと補強材の接合部が新たな破壊起点になることを示している．

文献[21]では，図 1-6 に示すように，スチーフナ上端部を切断して，スチーフナの両面にアングル材を設置する補強構造が検討されている．アングル材はデッキとメタルタッチさせた上でスチーフナにボルト接合している．平成 8 年に補強が行われたが，

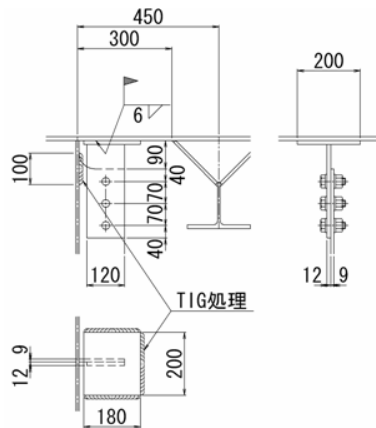


図 1-5 T 形補強材の設置[32]

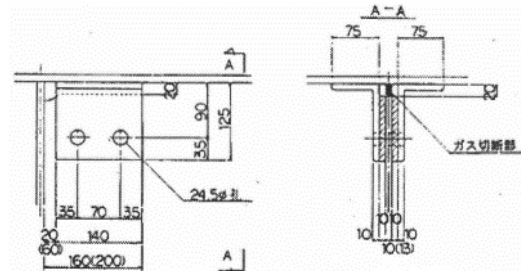


図 1-6 アングル材の設置[21]

8 年後の平成 16 年の点検で主桁ウェブと垂直補剛材の回し溶接部にき裂が発見され、この施工方法ではアングル材がデッキの変形を十分に抑制できなかったと考えられる。

森らは、デッキと補強材を密着させて、補強材がデッキの変形を確実に拘束することが重要と考え、L 形鋼をリフトアップして取り付ける 2 つの方法を提案している。1 つは、図 1-7 に示すように、テーパカラーを介してボルトを締め付けることで、L 形鋼をデッキに押し当てる施工方法[35,36]で、施工方法と併せてデッキと L 形鋼をより確実に密着させるための間詰め材の挿入についても検討している[37]。小型試験体を対象とした静的載荷試験と疲労試験から、高い応力低減効果が得られ、疲労耐久性が大幅に向上することを示している。また、作業性と効果の面から間詰め材には鉄粉入りのエポキシパテが適しているとしている。しかし、左右のテーパカラーの締め付け具合の違いや、L 形鋼設置時の微小な傾きにより、左右の L 形鋼でデッキとの接触圧が異なる場合があり、安定した補強効果が得られない可能性を示している。この問題を解消する目的で、左右の L 形鋼で同じ押し上げ力が得られるよう、図 1-8 に示す押し上げ力を定量的に管理することができる小型の油圧ジャッキを用いた方法[28]を提案している。そして、静的載荷試験と疲労試験から、き裂の発生を防ぎ、進展を大幅に遅延する効果が得られることを明らかにしている。

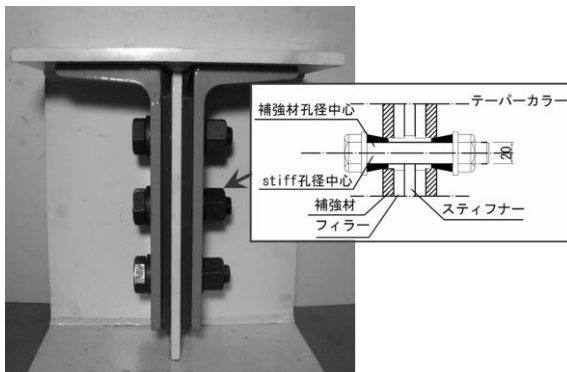


図 1-7 L 形鋼のリフトアップ補強 1
(テーパカラー) [12]

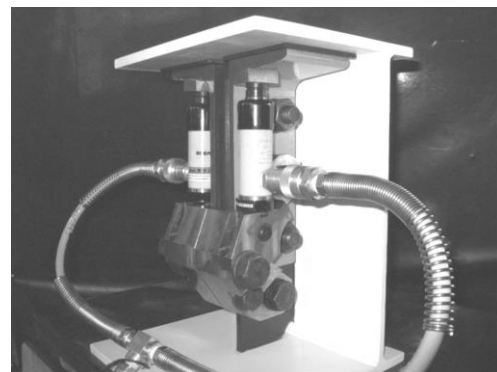


図 1-8 L 形鋼のリフトアップ
(油圧ジャッキ) [12]

垂直スティフナが破断するような大きなき裂が生じた場合を想定して，垂直スティフナ上端部を切断した上で，主桁ウェブの両面に三角リブ付きのアングル材を設置する補強構造が提案されている[38]（図 1-9）．モデル試験体の静的載荷試験から，主桁ウェブと垂直スティフナの溶接部の応力は十分に低減されており，疲労試験においてもき裂が発生しなかったとされている．しかし，この補強の施工には箱桁外の作業が伴うため，高所作業車や足場の設置など，アクセス方法の確保が問題となる．

剛性の高い樹脂を用いた樹脂ブロックを設置する補強についても検討されている[39]（図 1-10）．接合は，塗膜や錆を除去した既設構造に，樹脂ブロックと同等の特性値を有する初期硬化時間 5 分の速乾タイプのエポキシ樹脂を用いて接着する．実物大鋼床版試験体に対する静的載荷試験から約 30～50%の応力低減効果が得られたとしているが，長期耐久性については明らかでない．

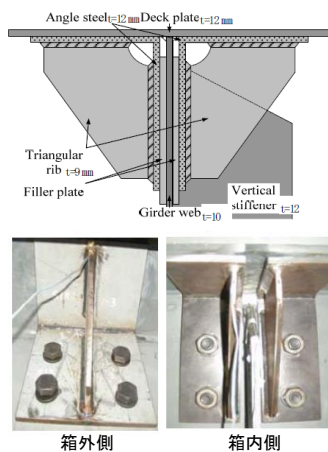


図 1-9 三角リブ付
アングル材設置[38]

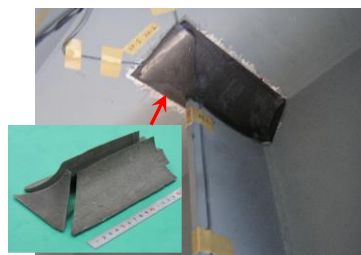


図 1-10 樹脂ブロック設置
[39]

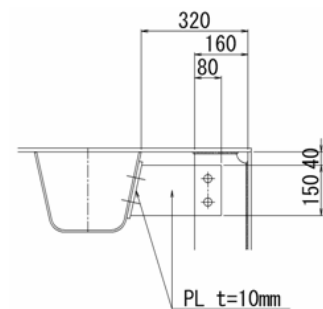


図 1-11 垂直スティフナと
U リブの接合[40]

文献[40]では，隣接 U リブと垂直スティフナを接合する補強構造について FEM 解析により検討されている．図 1-11 に示すように，垂直スティフナと U リブを接合することでデッキ側止端の応力は低減されるが，U リブとデッキの溶接ルートで応力が高くなることが示されている．

近年では，舗装工事の際の 2 時間程度を利用して，デッキを貫通したき裂を対象に，デッキの上面側から鋼板あるいはストランドシートを接着する補修方法が検討されている[41]（図 1-12）．この検討は面外ガセット試験体に対する曲げ疲労試験で行われており，両部材とも疲労き裂の進展を遅延させることができるが，補修部材がデッキから剥離すると遅延効果がなくなるとしている．また，ストランドシートの層を接着範囲の端部に向かって少なくすることで剥離を防ぐことができ，き裂の進展を遅延させる効果が持続するとしている．



図 1-12 デッキ上面への鋼板やストランドシートの設置[41]

(3) 構造ディテールの改良

構造ディテールの改良としては、垂直スティフナ上端部を切断してデッキとの間にギャップを設ける方法と、垂直スティフナ上端近傍に半円切欠きを設置する方法が検討されている。

文献[23,33]では、図 1-13 に示す垂直スティフナ上端部を 100mm 程度切断した構造について、実物大モデル試験体を用いた疲労試験により検討している。疲労試験の結果、上端を切断した構造では、切断前の構造と比べて 2～2.5 倍程度に寿命が延びるが、主桁ウェブと垂直スティフナの溶接部にき裂が生じると報告されている。文献[40,42]では、前述と同様の構造に対する FEM 解析と試験体を用いた静的載荷試験が行われており、切断後は主桁ウェブと垂直スティフナの溶接部に高い応力が生じるという結果が示されている。

文献[30]では、図 1-14 に示す垂直スティフナ上部に半径 50mm の半円切欠きを設置する補修において、その設置位置が検討されている。検討は面外ガセット試験体を対象とした板曲げ疲労試験で行われており、溶接脚長 4mm の試験体で半円切欠きの縁をデッキから 7mm の位置まで近づけた場合に疲労寿命が 2 倍程度になるとしている。文献[38,43]では、半径 85mm あるいは 105mm の半円切欠きを、その縁がデッキから 20mm になるよう設置した場合の効果について、供試体を用いた疲労試験と FEM 解析、実橋の応力測定試験から検討し、高い応力低減効果とき裂の進展を遅延・停留させる効果があるとしている。また、より高い効果を得るために、半円切欠きをデッキにより近づけたほうがよいとしている。

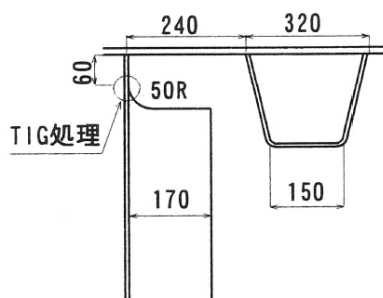


図 1-13 スティフナ上端部切断[23]

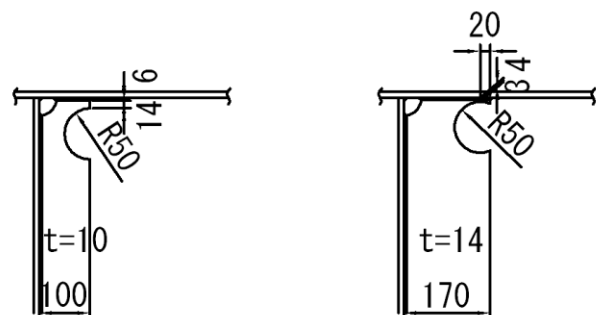


図 1-14 半円切欠きの設置[30]

(4) その他のき裂補修

(2), (3)で示したように、垂直スティブナ上端部に生じる応力を低減させる補修・補強方法は複数提案されており、高い補修効果が得られることが明らかにされているものもある。しかし、それらを施工するには時間やコストが掛かるため、実橋で適用されているものは少なく、実橋ではき裂の補修を行うことで措置を完了としている場合が多い[44]。

一般に実橋のき裂調査は磁粉探傷試験で行われることが多く、垂直スティブナ上端溶接部においてはき裂の先端が溶接止端に留まっているか、あるいはデッキ母材まで進展しているかで異なる補修が行われている。磁粉探傷試験で発見された指示模様(きずの位置を示す模様)の先端が溶接止端に留まる段階では、鋭い止端形状による疑似模様であることも多く、磁粉探傷試験のみでき裂の有無を判断することは難しい。そのため、垂直スティブナ上端の溶接止端部に指示模様が発見された場合には、き裂の有無の判断を容易とする効果もあることから、切削によるき裂の除去が行われることが多い[44]。しかし、き裂による指示模様でない場合の切削作業は本来であれば必要なく、き裂に対する切削作業であっても、磁粉探傷試験とバークグラインダによる切削を交互に繰り返す、き裂の進展方向を確認しながら削り進めなければならないため、作業員の高い技量が必要である。また、切削でき裂が除去された場合には、止端仕上げを行い措置を完了とするが、き裂が深い場合にはデッキの減厚が大きくなることによるき裂の再発生が懸念される。また、切削に要する作業時間が長くなるうえに、き裂の先端が除去しきれない場合には、そこからすぐにき裂が進展することもある。なお、文献[45]では、面外ガセット試験体を対象に、き裂の除去による削り込みを再現した上で曲率半径 3mm 程度に仕上げた条件で疲労試験を行っており、削り込みが深い場合にはデッキ上面側からき裂が発生するという結果が示されている。そのため、維持管理の効率化やコストの縮減のために、き裂の切削除去に代わる簡易かつ効果の高い補修方法を確立することが求められている。

既に発生しているき裂に対して疲労強度向上法の一つであるピーニングを適用した効果についていくつかの報告がある。なお、ピーニングとは溶接部を打撃し、塑性変形させることで、溶接による引張残留応力を軽減させるものである。文献[46]では、SM490 材で製作した面外ガセット継手を対象に、微小な疲労き裂に対する超音波衝撃処理 (UIT) [47]の効果について検討している。そして、公称応力範囲 150N/mm^2 、応力比 0.1 の条件で疲労試験を行った場合に、深さ 0.8mm までであればき裂の進展を停止できるという検討結果を報告している。UIT のメカニズムは以下のように考えられる。き裂がない状態で UIT を施工した場合は、図 1-15 に示すように、ピンの打撃で生じた溶接止端の塑性変形部を、その周囲が拘束することで圧縮残留応力が発生し疲労寿命が向上する。き裂がある状態で UIT を施工したこの実験では、図 1-16 に示すように、き裂面の一部あるいは全面が閉口し、さらに圧縮残留応力が導入されてき裂が開口しなかったことで、き裂先端の応力低減効果が持続して、その進展が停留したと考えられる。そのため、垂直スティブナ上端溶接部のような圧縮応力場に適用されれば、

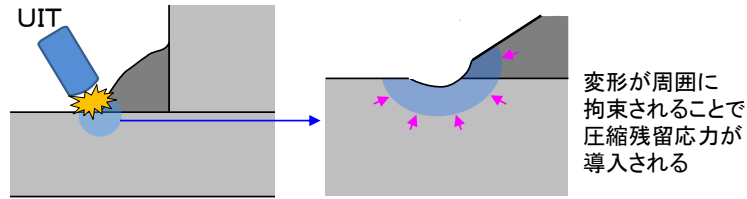


図 1-15 き裂がない状態での UIT による圧縮残留応力の導入

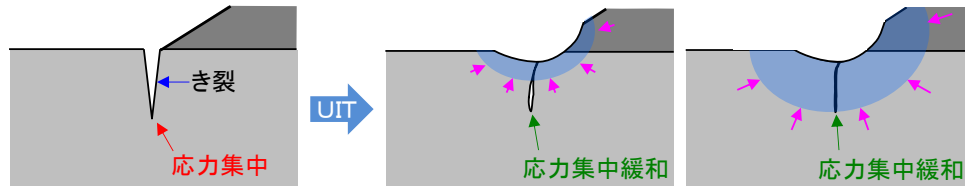


図 1-16 UIT によるき裂閉口のイメージ

き裂は開口せずにより高い効果が得られると考えられるが、圧縮応力場の疲労き裂に対する UIT の効果については検討されていない。圧縮応力場のき裂に対するピーニングの検討として、ICR 処理[48]の適用が検討されている[45,49]。ICR 処理とは、エアハンマー（フラックスチッパ）で疲労き裂近傍を叩いてき裂表面を閉口させることで、き裂の進展を抑制する技術である。それらの検討では、面外ガセット試験体を用いた板曲げ振動疲労試験機[30]による疲労試験が行われており、ICR 処理を施すことで疲労寿命は増加し、その効果は応力範囲が低いほど大きくなるとされている。しかし、ICR 処理では、溶接止端のき裂に対してはその近傍の母材を打撃することで、母材部に進展したき裂に対してはき裂の両側を打撃した後にき裂直上に打撃を与えることでき裂を閉口するため、き裂を直接打撃する工法と比べると施工が難しいと考えられる。また、板曲げ振動疲労試験機による疲労試験では、垂直スティフナによる拘束が模擬できていない可能性があり、実橋梁の応力状態が十分に再現できているかは明らかでない。先に示した UIT に関する検討のように、き裂の上から直接打撃を与えるピーニング工法を適用すれば、より簡単な施工で高い効果が得られる可能性がある。また、これにより切削作業が省略されれば、施工に要する時間やコストの縮減も期待できる。

き裂が溶接止端を離れてデッキ母材まで進展している場合には、き裂の先端にストップホールが設置されることが多く[44]、このき裂はある程度進展した後に停留する傾向があるため[28,30]、ストップホールのみで措置を完了としていることも少なくない。しかし、垂直スティフナ上端溶接部に対するストップホールの効果についての検討事例はまだ少なく[45]、十分に明らかとされていないのが現状である。また、垂直スティフナ上端部のように公称応力を得ることが難しい部位にストップホールを適用するためには、構造ディテールやストップホールの設置による応力集中を考慮したストップホール壁の応力で疲労耐久性を評価するための基準を整理する必要がある。

1.3 研究の目的と論文構成

本研究では、鋼床版垂直スチフナ上端溶接部に生じる疲労き裂に対して確実に効率的な補修方法を提案することを目的に、補修方法を検討するために不可欠と考えられるき裂の発生・進展性状を明らかにしたうえで、き裂の大きさごとに補修方法を検討した。すなわち、先端が溶接止端に留まるき裂に対しては、図 1-17 に示すき裂の上から UIT を施工する補修方法の効果について検討し、デッキ母材まで進展したき裂に対しては、図 1-18 に示す従来から適用されているストップホールの効果を確認するための検討を行った。

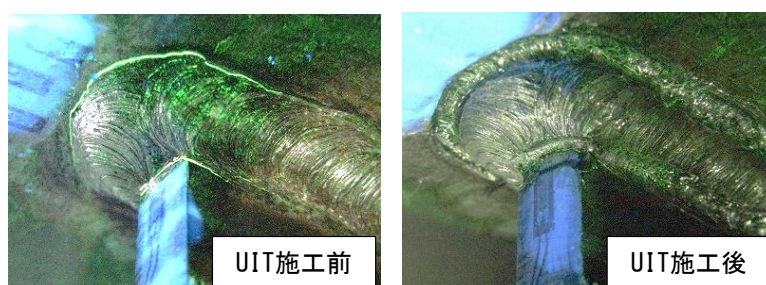


図 1-17 UIT の施工前後状況

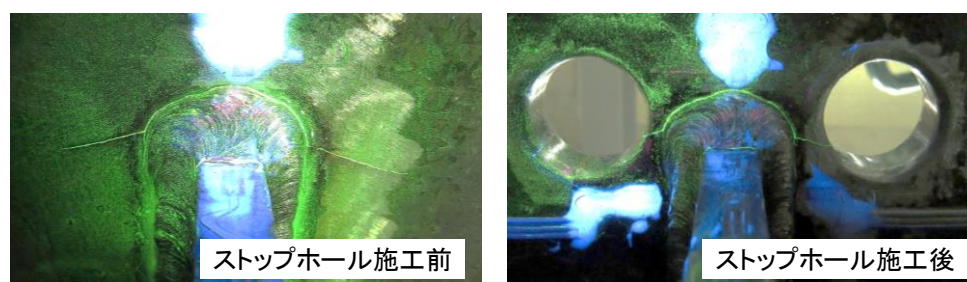


図 1-18 ストップホールの施工前後状況

本論文は 6 章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章「序論」では、構造物の維持管理の重要性が認識された時代背景について述べるとともに、鋼床版の構造的な特徴や疲労損傷事例を示した。鋼床版垂直スチフナの疲労損傷の原因や補修補強に関する既往の研究や事例を整理し、現状の課題をまとめるとともに、研究の目的と本論の構成を述べた。

第 2 章「疲労き裂の発生起点と進展挙動の研究」では、図 1-2 に示す実橋で発見されているき裂の再現と、深さ方向のき裂の進展挙動を明らかにすることを目的に、小型試験体を対象に溶接形状・寸法とルートギャップをパラメータとした疲労試験と FEM 解析を行った。そして、タイプ 1 のき裂は、疲労試験開始後すぐに発生し、深さ方向には荷重繰返し数とほぼ比例して進展するが、き裂深さが 8mm 程度以上になると停留する、タイプ 2・3 のき裂は、本研究の試験条件では溶接部あるいはウェブの方向に数 mm 進展した後停留する、タイプ 4 のき裂は溶接部が小さくルートギャップを設けた試験体で発生し、タイプ 1 のき裂と同様にデッキにある程度進展した後は進展速

度が遅くなることを疲労試験により明らかにした。また、FEM 解析から、ルート部の応力はのど厚が小さいほど高くなり、その応力は溶接形状によらず、のど厚で整理できることを示した。また、疲労破壊起点がどのような条件で決まるかを **Effective Notch Stress** を用いて検討し、ルート部が疲労破壊起点となるのはのど厚が極端に小さい場合である可能性を示し、通常の溶接およびルートギャップでは、溶接ルート部が疲労破壊起点になる可能性は低いことを示した。

第 3 章「溶接止端に留まるき裂に対する UIT の効果」では、き裂の先端が溶接止端に留まる比較的小さい疲労き裂を対象に、き裂の上から UIT を施工する補修の効果について小型試験体を用いた疲労試験、FEM 解析、残留応力測定等から検討した。そして、UIT による凹み深さが極端に浅い場合を除いて、デッキ側止端に留まるき裂（深さ 4mm 程度以下）を停留できること、デッキ側止端のき裂を停留させることでルート部からき裂が発生すること、そのルートき裂の進展速度はデッキ側止端のき裂に比べて十分に遅いことを明らかにした。さらに、UIT による凹み深さが浅い場合にはき裂が進展するが、溶接のままの進展速度に比べると遅いことを示した。以上のように、溶接止端に留まるき裂に対して UIT を適用することで高い補修効果が得られることを明らかにし、高い補修効果を得るためには UIT の凹み深さを管理することが重要であることを示した。

第 4 章「デッキプレート母材に進展したき裂に対するストップホールの効果」では、先端がデッキ母材まで進展しているき裂に対するストップホールの効果を明らかにする目的で、小型試験体の疲労試験と FEM 解析を行った。また、既往の疲労試験データを基に、ストップホールで補修した部材の疲労耐久性評価を行うための疲労強度曲線について検討した。小型試験体を用いた検討により、垂直スティブナ上端溶接部に生じるき裂に対して、ストップホールが高い補修効果を有していることを示した。また、実橋の様々な部位に適用されるストップホールの疲労耐久性評価を想定して、ストップホール壁を仕上げない場合と仕上げた場合それぞれに対して、ストップホール壁の最大応力で評価することができる疲労強度曲線を提案し、ここで行った疲労試験結果と比較することでその有効性を確かめた。

第 5 章「実橋への適用性の検討」では、UIT やストップホールを実橋に適用した場合の効果を明らかにするため、第 2 章～第 4 章の検討に用いた小型試験体の疲労試験が実橋の載荷条件やそれに伴う応力性状をどの程度再現できているかについて検討した。垂直スティブナ上端溶接部に疲労き裂が発生している橋梁を対象とした実橋モデルと試験体モデルの FEM 解析結果の比較から、春・秋を想定した舗装剛性では 37.5ton、夏を想定した舗装剛性では 25ton の車両が載荷された際に生じる最大応力と同程度の応力が試験体による疲労試験で再現されていたことを明らかにし、UIT やストップホールが実橋においても高い補修効果を有していることを示した。さらに、それまでの検討結果を踏まえて、垂直スティブナ上端溶接部の補修方法と補修個所の選定方法、および UIT とストップホールの施工方法についてまとめた。

第 6 章「結論」では、本研究で得られた成果をまとめて示している。

【参考文献】

- [1] 国土交通省：鋼橋（上部構造）の損傷事例，道路の老朽化対策 参考資料 道路橋の重大損傷－最近の事例－，国土交通省ホームページ，http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_1.pdf（2016.11 参照）
- [2] 国土交通省 道路橋の予防保全に向けた有識者会議：道路橋の予防保全に向けた提言，国土交通省ホームページ，http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1_2.pdf（2016.11 参照）
- [3] 国土交通省 社会資本整備審議会・交通政策審議会技術分科会技術部会 社会資本メンテナンス戦略小委員会：本格的なメンテナンス時代に向けたインフラ政策の総合的な充実～キックオフ「メンテナンス政策元年」～，国土交通省ホームページ，<http://www.mlit.go.jp/common/000986603.pdf>（2016.11 参照）
- [4] インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議：インフラ長寿命化基本計画，国土交通省ホームページ，<http://www.mlit.go.jp/common/001040309.pdf>（2016.11 参照）
- [5] 国土交通省 社会資本の老朽化対策会議：国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画），国土交通省ホームページ，<http://www.mlit.go.jp/common/001040664.pdf>（2016.11 参照）
- [6] 東・中・西日本高速道路 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会：高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会報告書，中日本高速道路ホームページ，<https://www.c-nexco.co.jp/corporate/pressroom/committee/pdf/houkokusyo.pdf>（2016.11 参照）
- [7] 首都高速道路 首都高速道路構造物の大規模更新のあり方に関する調査研究委員会：首都高速道路構造物の大規模更新のあり方に関する調査研究委員会報告書，首都高速道路ホームページ，<http://www.shutoko.co.jp/~media/pdf/corporate/company/enterprise/road/largescale/07/hokokusho.pdf>（2016.11 参照）
- [8] 阪神高速道路 阪神高速道路の長期維持管理及び更新に関する技術検討委員会，阪神高速道路の長期維持管理及び更新に関する技術検討委員会提言，阪神高速道路ホームページ，https://www.hanshin-exp.co.jp/company/pressrelease/20130417_teigen.pdf（2016.11 参照）
- [9] 日本橋梁建設協会：日本の橋 多彩な鋼橋の百余年史，1994.
- [10] 土木学会鋼構造委員会鋼構造進歩調査小委員会橋床構造の進歩調査分科会：鋼床版の発展と現況，Vol.67，No.10，pp.34-40，1982.
- [11] 日本道路協会：鋼橋の疲労，1997.
- [12] 土木学会：鋼床版の疲労 2010 年改訂版，2010.
- [13] 日本道路協会：道路橋示方書（Ⅰ 共通編・Ⅱ 鋼橋編）・同解説，2002.
- [14] 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.
- [15] 日本道路協会：道路橋示方書（Ⅰ 共通編・Ⅱ 鋼橋編）・同解説，1980.

- [16] 三木千寿，菅沼久忠，富澤雅幸，町田文孝：鋼床版箱桁橋のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因，土木学会論文集，No.780/I-70，pp.57-69，2005.
- [17] 国土技術政策総合研究所，社団法人日本橋梁建設協会：鋼部材の耐久性向上策に関する共同研究－実態調査に基づく鋼床版の点検手法に関する検討－，国土技術政策総合研究所資料，No.471，2008.
- [18] 吉川直志，伊藤昇，大塚敬三，町田文孝，三木千寿：Uリブを用いた鋼床版の疲労損傷事例，土木学会第 57 回年次学術講演会，I-277，2002.
- [19] 神木剛，町田文孝，下里哲弘，澁谷敦，増井隆，弓削太郎：鋼床版の疲労き裂発生パターンに関する一分析，土木学会第 59 回年次学術講演会，I-544，2004.
- [20] 神木剛，下里哲弘，弓削太郎：鋼床版箱桁ウェブの垂直補剛材溶接部の疲労き裂対策検討，土木学会第 60 回年次学術講演会，I-398，2005.
- [21] 平林泰明，牛越裕幸，木ノ本剛：首都高速道路における鋼床版疲労損傷，鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，Vol.10，pp.39-53，2007.
- [22] 高田佳彦，平野敏彦，坂野昌弘：阪神高速道路における鋼床版の疲労損傷状況報告，土木学会第 61 回年次学術講演会，I-535，2006.
- [23] 堀江佳平，高田佳彦：阪神高速道路の鋼床版疲労損傷の現状と取組み，鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 Vol.10，pp.55-69，2007.
- [24] 山田健太郎：重交通下における鋼床版の疲労損傷－名古屋周辺での事例－，鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，Vol.10，pp.11-18，2007.
- [25] 岩崎雅紀，狩生輝己，西洋司：実橋測定による鋼床版主桁ウェブ垂直補剛材上端部の疲労検討，土木学会第 43 回年次学術講演会，I-139，1988.
- [26] 鈴木巖，加賀山泰一，岩崎雅紀：鋼床版デッキプレートおよび局所の疲労検討，土木学会第 44 回年次学術講演会，I-191，1989.
- [27] 藤井裕司，西川和廣，村越潤，田中良樹：鋼床版のデッキプレートとスティフナの溶接部の疲労試験，土木学会第 47 回年次学術講演会，I-129，1992.
- [28] 森猛，原田英明，大住圭太，平山繁幸：鋼床版垂直スティフナ溶接部に生じる疲労き裂の補修・補強方法，鋼構造論文集，Vol.18，No.69，pp.51-69，2011.
- [29] 松本毅，遠藤和男：デッキとスティフナの溶接部の疲労実験，本四技報，Vol.17，No.67，pp.33-36，1993.
- [30] 山田健太郎，小藺江朋堯，小塩達也：垂直補剛材と鋼床版デッキプレートのすみ肉溶接の曲げ疲労試験，鋼構造論文集，Vol.14，No.55，pp.1-8，2007.
- [31] 渡辺直起，山田聡，山田健太郎，中村桂久，高木達弘：鋼床版デッキプレートと垂直補剛材溶接部の疲労強度と補修工法の効果，トピー鉄構技報，No.23，pp.14-22，2007.
- [32] 梶原一夫，小暮深，古閑俊之：鋼床版橋に生じた疲労亀裂の補修・補強，土木学会第 46 回年次学術講演会，I-193，1991.
- [33] 佐藤徹，関惟忠，西岡敬治，乙黒幸年：鋼床版箱桁の垂直補剛材に生じた疲労亀裂の補修，土木学会第 51 回年次学術講演会，I-A374，1996.

- [34] 阪神高速道路技術センター：阪神高速道路における鋼橋の疲労対策[改訂版]，2005.
- [35] 公門和樹，森猛，田中雅人，宮原幸春，小芝明弘：鋼床版垂直スチフナーすみ肉溶接部の疲労を考慮した補強方法，土木学会第 60 回年次学術講演会，1-501，2005.
- [36] 大住圭太，森猛，山田浩二，浅岡敏明：鋼床版垂直スチフナーすみ肉溶接部の疲労を対象とした補強方法，土木学会第 61 回年次学術講演会，1-540，2006.
- [37] 大住圭太，森猛，田中雅人：疲労亀裂を有する鋼床版垂直スチフナーすみ肉溶接部の補強に関する検討，土木学会第 62 回年次学術講演会，1-006，2007.
- [38] 高田佳彦，川上順子，酒井優二，坂野昌弘：半円切欠きを用いた既設鋼床版橋主桁垂直補剛材上端部の疲労対策，鋼構造論文集，Vol.16，No.62，pp.35-46，2009.
- [39] 杉浦江，小出宜央，安森浩，加藤健：(4)樹脂ブロック補強による隅肉溶接継手の疲労強度向上，第 9 回複合・剛性構造の活用に関するシンポジウム，pp.25-32，2011.
- [40] 石川誠，江崎正浩，村越潤，有馬敬育：鋼床版デッキプレートと主桁ウェブ垂直補剛材溶接部の疲労損傷補修・補強構造検討，土木学会第 61 回年次学術講演会，1-541，2006.
- [41] 青木康素，石川敏之，松本理佐，河野広隆，足立幸郎：垂直補剛材上端のデッキプレート貫通き裂への当て板接着補修，鋼構造論文集 Vol.61A，pp.408-415，2015.
- [42] 八木貴之，江崎正浩，村越潤，梁取直樹，宇井崇：鋼床版橋梁の垂直補剛材上端部の疲労損傷に対する補修方法とその効果，土木学会第 63 回年次学術講演会，1-204，2008.
- [43] 高田佳彦，川上順子，青木康素，坂野昌弘，酒井優二：半円切欠き工法による鋼床版垂直補剛材溶接部の疲労対策の検討，鋼構造年次論文報告集，Vol.15，pp.343-350，2007.
- [44] 小林裕輔，奥原正大，五十嵐三雄，宇佐美隆宣：鋼床版の疲労損傷と補修・補強の一例，宮地技報，No.27，pp.78-81，2014.
- [45] 松本理佐，石川敏之，塚本成昭，栗津祐太，河野広隆：鋼床版垂直補剛材溶接部のき裂を対象とした各種補修法の効果の比較に関する研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.72，No.1，pp.192-205，2016.
- [46] 富永知徳，本間宏二，松岡和巳：初期疲労き裂を有する溶接継手の超音波衝撃処理（UIT）による疲労寿命向上，土木学会第 64 回年次学術講演会，I-150，2009.
- [47] 国土交通省：新技術活用システム NETIS（New Technology Information System）. 超音波ピーニング処理（UIT）工法．KTZ-070004-V，2014.
- [48] 山田健太郎，石川敏之，柿市拓巳：疲労き裂を閉口させて寿命を向上させる試み，土木学会論文集 A，Vol.65，No.4，pp.961-965，2009.
- [49] 舘石和雄，判治剛，石川敏之，清水優：引張または曲げ荷重を受ける溶接継手に対する ICR 処理の効果，構造工学論文集，Vol.61A，pp.627-637，2015.

第2章 疲労き裂の発生起点と進展挙動の検討

2.1 はじめに

図 2-1 に示すように，鋼床版垂直スティフナ上端溶接部に生じる疲労き裂の発生起点は回し溶接部のデッキ側止端，スティフナ側止端，ルート部の 3 箇所に大別され，進展性状は 4 タイプに分類される．中でも，タイプ 1 とタイプ 2 のき裂の報告が多い [1,2]．

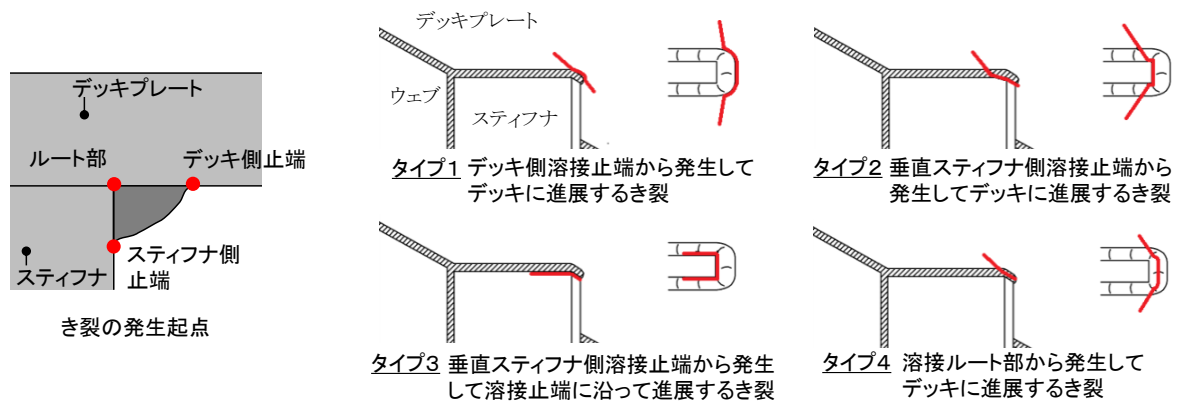


図 2-1 疲労損傷事例

このように，き裂の発生・進展性状が異なる原因として，荷重の載荷位置，構造ディテール，溶接のサイズ・形状・ルートギャップ等が考えられるが，そのメカニズムは明らかとされていない．なお，5 章の図 5-2～5-4 に示す実橋の損傷事例のように，同一ラインに位置する垂直スティフナにおいても異なるタイプのき裂が発生することが確認されている．

文献[3]では，デッキ・垂直スティフナ接合部を模擬した小型試験体の疲労試験を行い，以下の結果を示している．①タイプ 1 とタイプ 3 の疲労き裂を再現した（図 2-2）．②タイプ 1 の疲労き裂は繰返し荷重載荷直後に生じ，その後急速に進展する．このき裂がある程度の長さになると，デッキ上面からもき裂が発生し，これら 2 つのき裂は合体する．その後，疲労き裂の進展は遅くなり，ほぼ停留する傾向がある（図 2-3,2-4）．③タイプ 3 の疲労き裂は繰返し荷重載荷直後に生じ，その後急速に進展する．しかし，き裂長さがある程度以上になると停留する傾向がある（図 2-5）．以上の結果は表面で観察したき裂の進展性状であり，深さ方向のき裂進展性状は明らかにされていない．また，タイプ 2 とタイプ 4 の疲労き裂の再現もなされていない．

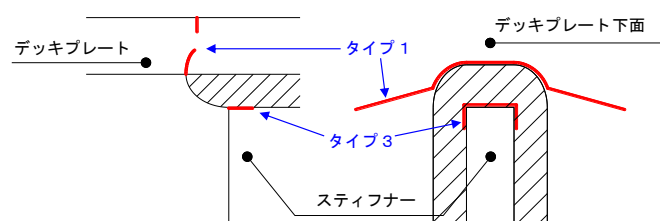


図 2-2 小型試験体で再現された疲労き裂[3]

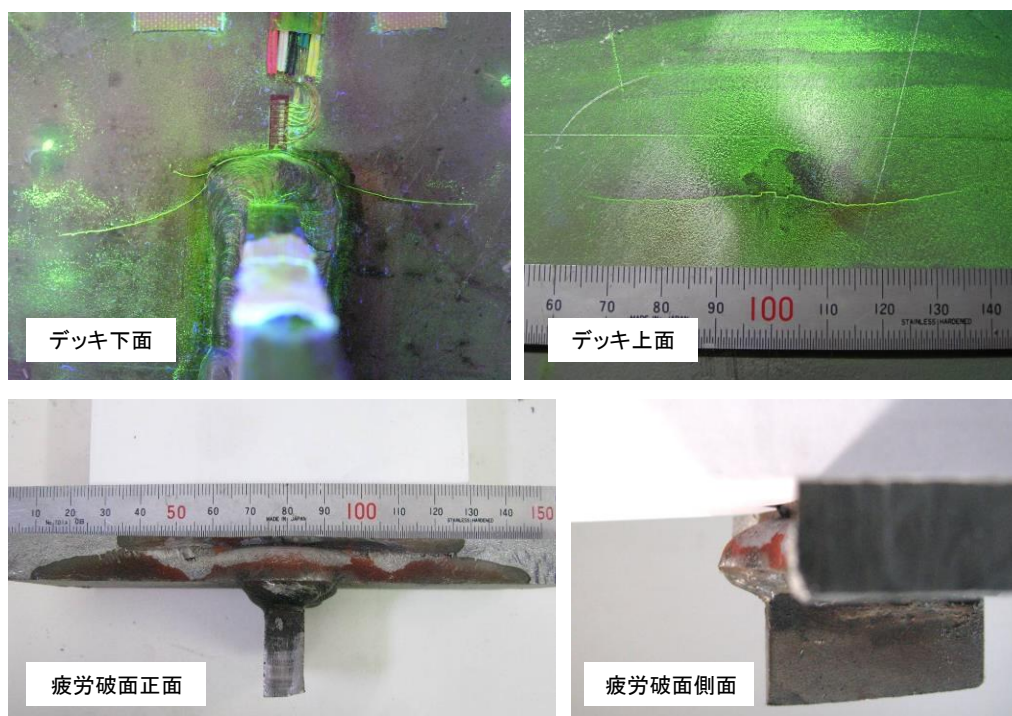


図 2-3 デッキの上下面で観察された疲労き裂とそれらの疲労破面[3]

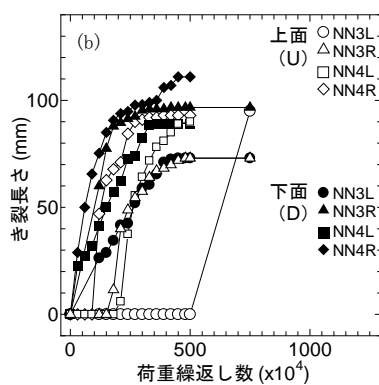
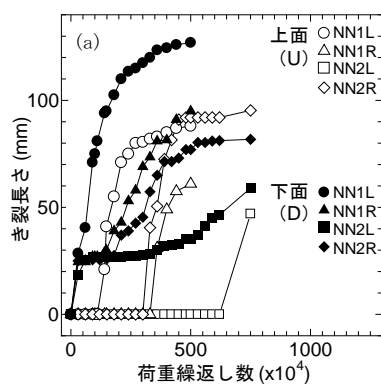


図 2-4 タイプ 1 の進展性状[3]

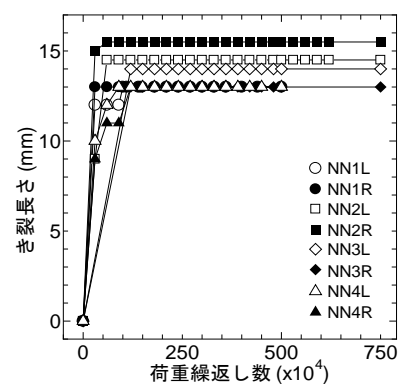


図 2-5 タイプ 3 の進展性状[3]

本章では、文献[3]と同じ小型試験体を対象として、これまでに再現のできていないタイプ 2 と 4 のき裂を再現すること、回し溶接部のデッキ側止端から生じる疲労き裂の深さ方向の進展挙動を明らかにすることを目的に疲労試験と応力解析を行った．その際に、溶接形状の影響検討と併せて、止端仕上げの効果についても検討した．そして、先述の 3 つの疲労破壊起点（デッキ側止端，スティフナ側止端，溶接ルート）がどのような条件で決まるかを有効切欠き応力の概念を用いて検討した．

2.2 試験体

試験体は鋼床版のデッキと垂直スティフナの接合部を模擬した小型試験体であり、デッキ、ウェブ、スティフナ、下フランジで構成されている。図 2-6 にその形状と寸法を示す。供試鋼材は SM400A とした。溶接は垂直スティフナをウェブに水平姿勢で行い、そして垂直スティフナをデッキに水平姿勢で溶接した。その後、ウェブとデッキ、ウェブと下フランジを同じく水平姿勢で溶接した。なお、デッキと垂直スティフナの接合は被覆アーク溶接、それ以外の接合は炭酸ガス半自動アーク溶接で行っている。いずれの溶接ともすみ肉溶接であり、溶接パス数は 1 である。試験体には 2 つのデッキ・垂直スティフナ接合部があるため、それらを L・R で区別する（図 2-6 参照）。

デッキと垂直スティフナの接合部にはギャップを設けており、目標としたギャップの大きさは $0.1 \sim 2\text{mm}$ である（G0, G1, G2）。図 2-7 に試験体の溶接形状の種類、図 2-8 にそれらの例を示す。溶接のままの試験体を AW、デッキ側溶接止端に仕上げを施した試験体を GR、溶接部を切削した後にデッキ側・スティナ側止端とも仕上げを施した試験体を SG と呼ぶ。そして、それぞれの種類の試験体の 1 体目を G0AW-1 のように記す。なお、溶接部の切削・仕上げは超硬バーあるいは軸付砥石を用いている。試験体数は G0AW が 5 体、G0GR が 2 体、G2GR が 2 体、G1SG が 1 体、G2SG が 5 体である。ただし、2 体の G2GR 試験体の内 1 体はスティフナ側溶接止端も仕上げている。そのため、スティフナ側止端を仕上げていない試験体を G2GRA、仕上げた試験体を G2GRB と区別する。また、G2SG 試験体の内 2 体は等脚となるように、3 体はデッキ側に長い不等脚となるように切削している。ここでは、それらの試験体を G2SGA, G2SGB 試験体と呼ぶ。

各試験体の溶接形状・寸法の測定結果を表 2-1 に示す。なお、測定は各回し溶接部の型を歯科用印象材で採取し、それを 2mm 程度の厚さに 4 枚切りだし、それらを 10 倍あるいは 20 倍の拡大投影機で観察することによって行っている。ここで示している値は各形式試験体の平均値である。

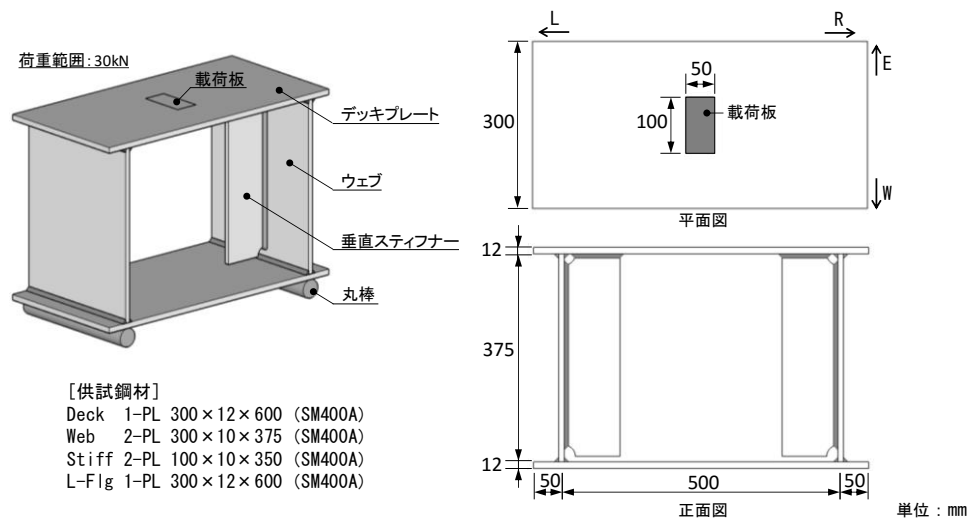


図 2-6 試験体の形状と寸法

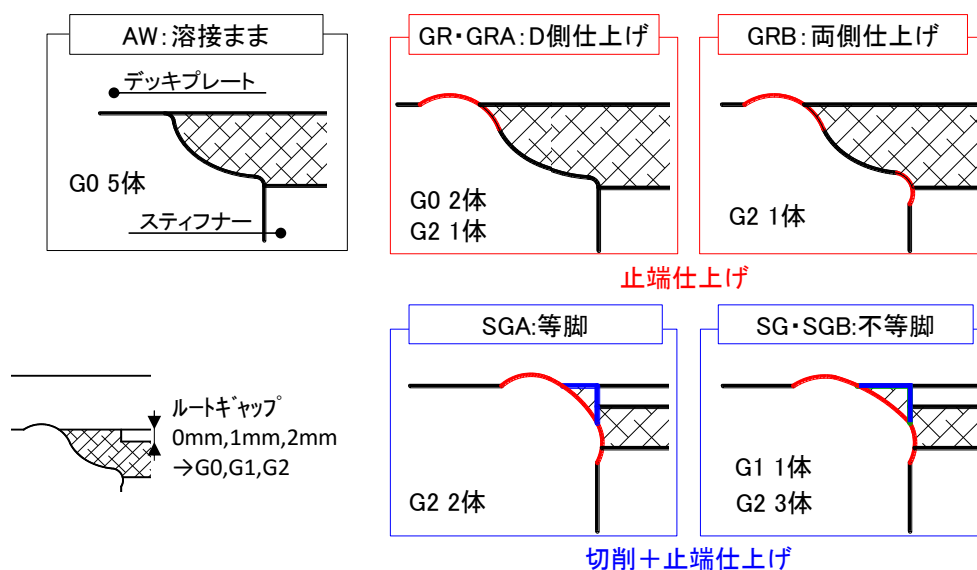
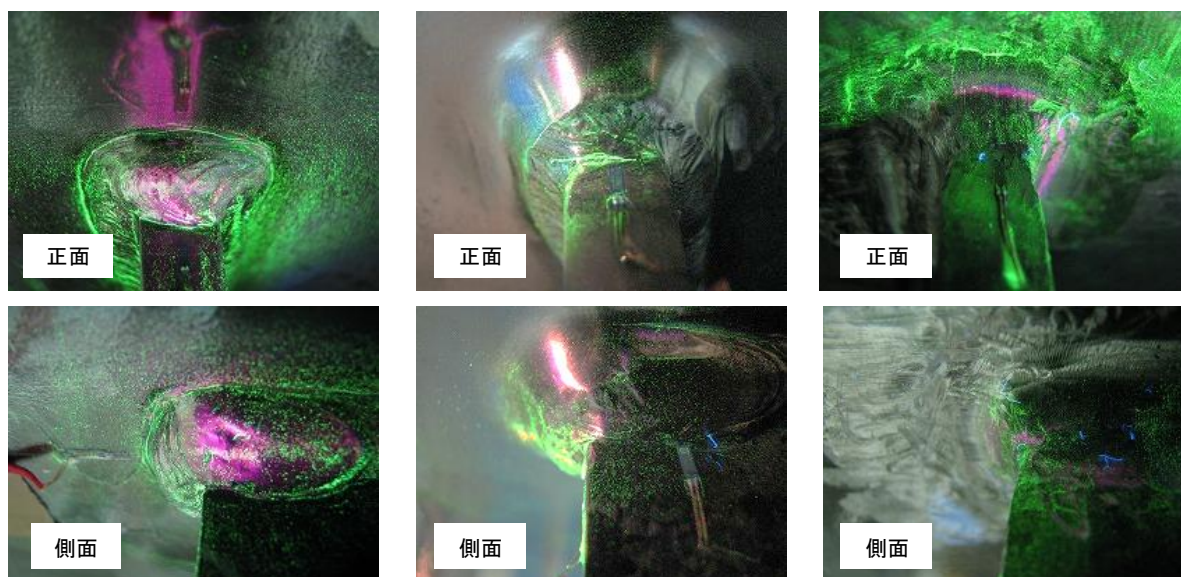


図 2-7 試験体の溶接形状の種類



溶接のまま (G0AW-1L) 止端仕上げ (G0GR-2L) 切削+止端仕上げ (G2SGA-1L)

図 2-8 各溶接形状種類の溶接部の例

表 2-1 溶接部の形状・寸法

試験体	脚長(mm)		止端半径(mm)	
	デッキ側	スティフナ側	デッキ側	スティフナ側
G0AW	9.1	6.5	0.8	1.5
G0GR	9.4	8.1	4.6	1.6
G2GRA	8.7	8.4	5.2	1.3
G2GRB	8.1	6.7	5.8	4.3
G1SG	1.9	2.1	5.4	6.1
G2SGA	3.3	3.2	7.9	9.4
G2SGB	5.0	2.9	6.7	6.8

2.3 疲労試験

2.3.1 試験方法と試験条件

2.2 節で示した試験体 15 体の疲労試験を行った。载荷位置は図 2-6 に示すようにデッキ上面中央の 50mm×100mm の範囲とし、ウェブ直下を鋼製丸棒で支持した状態で疲労試験を行った。荷重範囲は 30 kN（下限荷重：0.3kN，上限荷重：30.3kN），荷重繰返し速度は 5Hz とした。なお，本試験が実橋の载荷状態や応力性状をどの程度再現しているかを明らかにするために，5.2 節において，垂直スチフナ上端溶接部に疲労き裂が多数生じている実橋モデルと試験体モデルの FEM 解析結果を比較している。そして，垂直スチフナ上端部において，春・秋の舗装剛性を模擬した実橋モデルに重量 37.5ton，夏の舗装剛性では 25ton（前輪：後輪＝2：3）の車両が最も厳しい条件で载荷された際に生じるのと同程度の応力が本試験で再現されていることを明らかにしている。

5 体の G0AW 試験体については，き裂深さ方向の進展性状を調べる目的で，溶接止端から 5mm 離れたデッキ下面にひずみゲージ（ゲージ長 2mm，橋軸直角方向）を貼付し，ひずみ範囲の変化を観察した。なお，き裂深さとひずみ範囲変化の関係を明らかにする目的で，試験体ごとに疲労試験を終了する荷重繰返し数を変えている。その繰返し数は，それぞれ 25 万回，30 万回，50 万回，100 万回，400 万回である。疲労試験終了後，き裂が生じた部分を切り出し，それを液体窒素で冷却した後，ハンマーで打撃することにより疲労破面を暴露した。

G0AW 以外の試験体については，定期的に磁粉探傷試験を行い，き裂の発生・進展を観察しながら，ある程度長い疲労き裂が観察されるまで，あるいはき裂の停留が観察されるまで疲労試験を行った。これらの試験体についても，疲労試験終了後，疲労破面を暴露した。

2.3.2 溶接のままの試験体の疲労試験結果

G0AW 試験体において，疲労試験終了後の磁粉探傷試験で観察されたき裂の例を図 2-9 に示す。文献[3]と同様に，すべての試験対象において，デッキ側止端から発生してデッキ母材に進展するタイプ 1 とスチフナ側止端を進展するタイプ 3 が観察された。なお，タイプ 3 のき裂は，図 2-9 に示すように，こぼ面から数 mm 離れた位置まで進展した後は，停留していた。

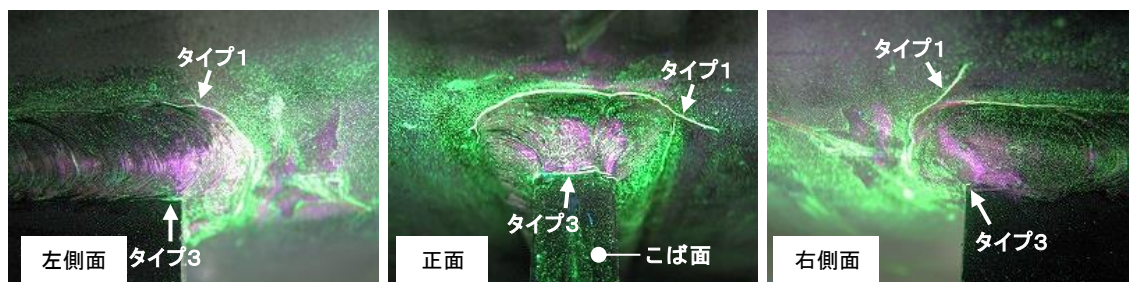


図 2-9 AW 試験体（溶接のまま）のき裂発生状況の例（G0AW-4R）

G0AW 試験体で測定したひずみ範囲と荷重繰返し数の関係を図 2-10(a)と(b)に示す。(b)は、荷重繰返し初期のひずみ範囲の変化を見やすくするために図の横軸である荷重繰返し数を 50 万回までとしている。いずれの試験体においても、初期のひずみ範囲は $1000 \sim 1200 \mu$ であり、試験体によって違いはあるものの、早期にひずみ範囲が減少し始め、荷重繰返しとともに減少を続けている。他の試験体に比べて荷重繰返し数の長い G0AW-5 試験体では、繰返し数が $150 \sim 250$ 万回になるとひずみ範囲の変化が小さくなり、その値はほぼ一定となっている。

疲労試験後に暴露した各試験体の疲労破面の例を図 2-11 に示す。いずれの試験体においても、疲労き裂は回し溶接のデッキ側止端から生じており、その形状は扁平な半楕円形となっている。また、その深さは多くの荷重繰返しを受けた試験体ほど深くな

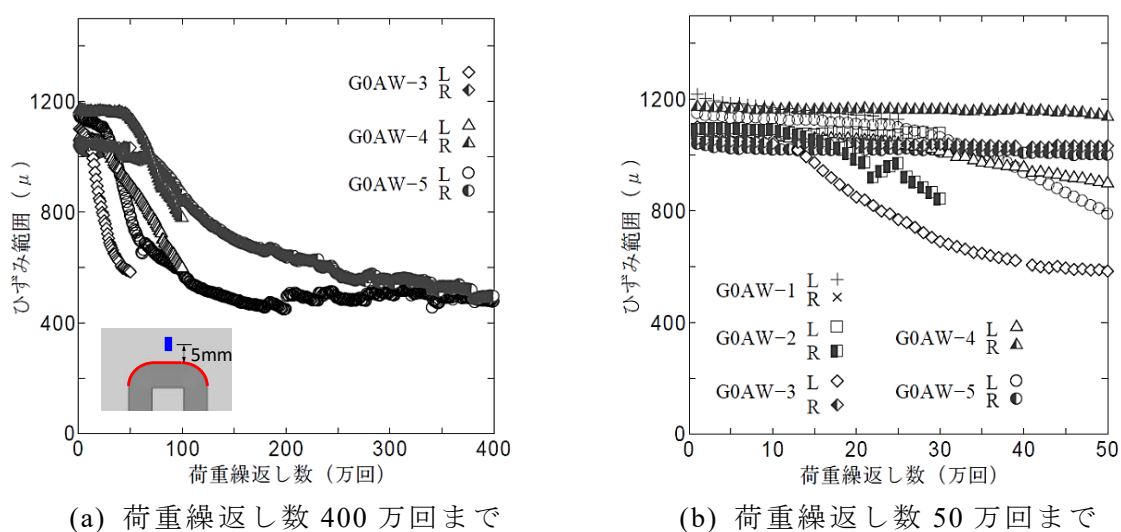


図 2-10 ひずみ範囲と荷重繰返し数の関係 (G0AW 試験体)

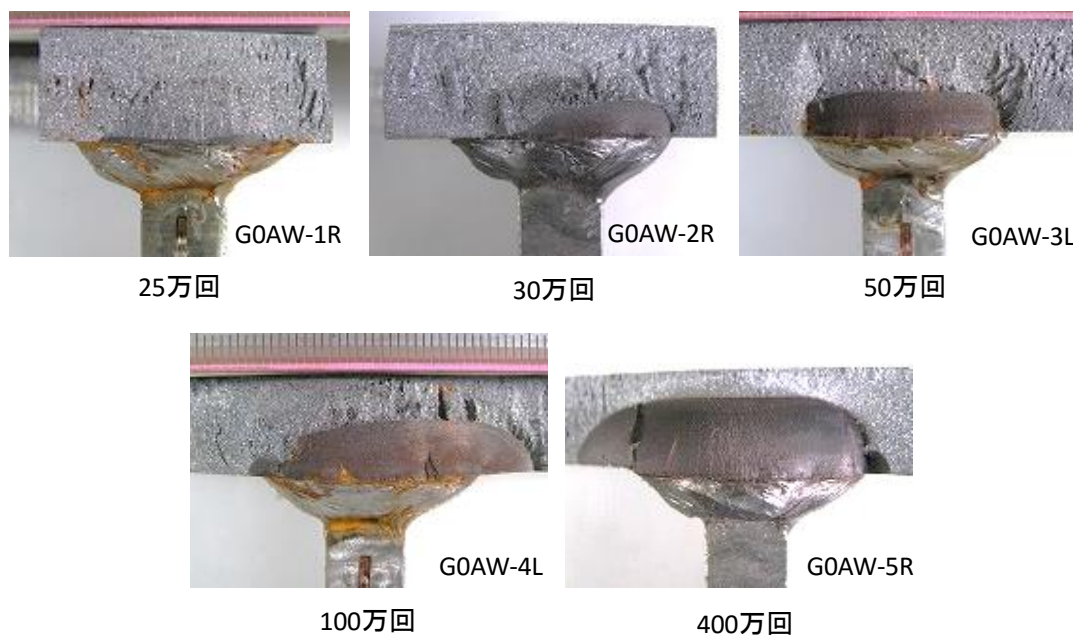


図 2-11 疲労破面の例

っている。G0AW-1R のき裂は、他のき裂に比べて扁平な形状をしており、2 つ以上の扁平な半楕円形のき裂が合体したような形状をしている。G0AW-1L の溶接においても同様のき裂が観察された。このことより、疲労き裂は溶接止端の複数の箇所から発生し、主として溶接止端に沿って進展した後に深さ方向に進展するものと考えられる。

図 2-11 に示した疲労破面の写真から求めた溶接止端中央のき裂深さ a と図 2-10 に示した試験終了時のひずみ範囲から求めたひずみ範囲減少率 r の関係を図 2-12 に示す。なお、 r は以下のように定義している。

$$r = \frac{\text{初期ひずみ範囲} - \text{ひずみ範囲}}{\text{初期ひずみ範囲}}$$

き裂深さ a とひずみ範囲減少率 r はほぼ線形関係にある。図中の実線は、 a - r 関係を線形とみなして最小 2 乗法で求めた回帰直線である。

図 2-12 に示した回帰直線と図 2-10 に示した荷重繰返しに伴うひずみ範囲の変化からき裂深さと荷重繰返し数の関係を求めた。その結果を図 2-13 に示す。なお、G0AW-1 と G0AW-2 試験体の結果は、荷重繰返し数が少なくき裂も浅いため、この図からは除いている。これらの試験体の試験終了時のき裂深さは G0AW-1 試験体で 1.20mm と 0.55mm (L 側と R 側)、G0AW-2 試験体で 0.57mm と 2.62mm であった。疲労き裂は荷重繰返しの比較的初期に発生し、荷重繰返し数にほぼ比例して進展し、き裂深さが 6~8mm になると進展が遅くなり、停留するような傾向が認められる。これは、既報 [3] で示したデッキ裏面でのき裂長さと荷重繰返し数の関係の傾向と同じである。また、デッキとトラフリブの溶接ルートから発生し、デッキに進展する疲労き裂の進展挙動 [4] の傾向とも一致している。き裂が停留する原因として、デッキの内部にいくほど溶接による引張残留応力の影響が小さくなること、き裂面の接触、図 2-3 に示す疲労破面のように、き裂が曲がりながら進展することで、き裂の先端に生じる応力性状が変化することなどが考えられるが、これらの影響は明らかとされていない。

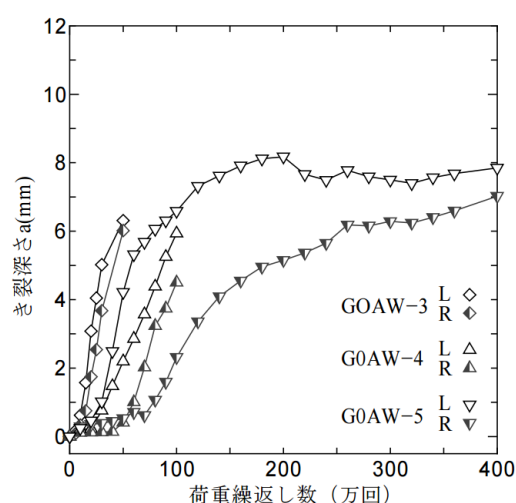
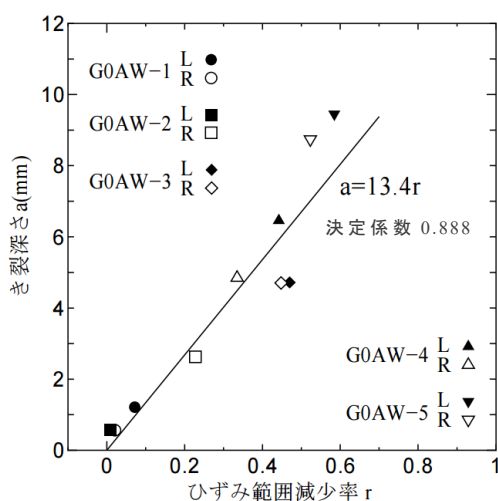


図 2-12 き裂深さとひずみ範囲減少率の関係 図 2-13 き裂深さと荷重繰返し数の関係

2.3.3 止端を仕上げた試験体の疲労試験結果

デッキ側の溶接止端を仕上げた G0GR 試験体と G2GRA 試験体の疲労試験結果を表 2-2 に示す。これらの試験体はタイプ 2 の疲労き裂の再現を狙ったものである。すなわち、既報[3]で示したように溶接のままの状態では、タイプ 1 とタイプ 3 のき裂が観察されたが、タイプ 3 のき裂は早期に発生するものの、ある程度進展した後すべて停留した。タイプ 2 のき裂はタイプ 3 のき裂と同様に、スティフナ側止端から発生して溶接止端に沿って進展した後、あるいは直接溶接部に進展するものであるが、溶接部に進展する前の停留はデッキ側の疲労き裂の存在によるものとも考えられる。すなわち、タイプ 1 のき裂がデッキに生じることにより、スティフナ側止端へ伝達される応力が減少するためにき裂が停留したとも考えられる。そのため、タイプ 1 のき裂が生じにくいように、デッキ側溶接止端を仕上げた試験体を準備した。また、これにより仕上げの効果を調べることもできる。表 2-2 には、スティフナ側止端の仕上げの効果を調べるために用いた G2GRB 試験体の疲労試験結果も示している。

G0GR-1 試験体の L 側で荷重繰返し数 500 万回において長さ 50mm のタイプ 1 のき裂が観察された。その状況を図 2-14 に示す。この試験体の R 側および他の試験体ではタイプ 1 のき裂は生じなかった。G0GR-1L でのデッキ側溶接止端の曲率半径は 3.6mm、G0GR-1R では 4.2mm、G0GR-2L で 5.2mm、G0GR-2R では 5.5mm であった。

表 2-2 止端を仕上げた試験体の疲労試験結果

試験体	荷重繰返し数 (万回)	き裂タイプ	き裂長さ (mm)
G0GR-1L	500	①③	50.0, 11.3
G0GR-1R		③	8.2
G0GR-2L	500	②	18.3
G0GR-2R		③	12.5
G2GRA-L	1100	③	7.3
G2GRA-R		②	12.9
G2GRB-L	600	②	5.2
G2GRB-R		③	4.8

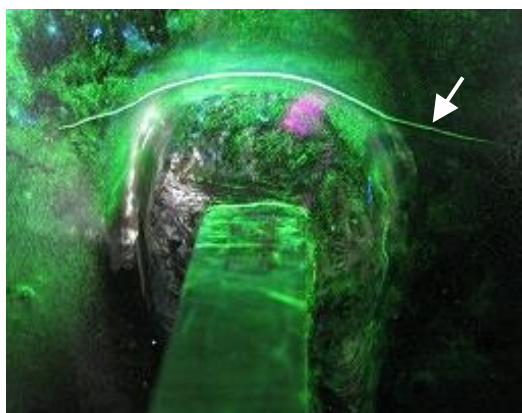


図 2-14 G0GR-1L に発生したタイプ 1 き裂

また, G2GR 試験体でのデッキ側溶接止端での曲率半径はすべて 5.0mm 以上であった. このように G0GR-1L での曲率半径が他の試験体・部位と比べて小さかったためにこの試験体・部位のみで疲労き裂が生じたものと考えられる. なお, 既報[3]で示した溶接のままの試験体で長さ 50mm のき裂が観察された荷重繰返し数は平均で 200 万回 (50~600 万回) であった. また, ここで行った試験では G0GR-1L 以外では 500~1100 万回の荷重繰返しによっても疲労き裂は生じていない. 以上のように, デッキ側溶接止端を 5mm 以上に仕上げれば, タイプ 1 のき裂に対する高い疲労強度改善効果が得られると考えられる.

スティフナ側溶接止端から発生するき裂 (タイプ 2 とタイプ 3) は, すべての試験体, すべての部位で観察された. その例を図 2-15 に示す. このようにスティフナ側の溶接止端から発生して溶接部を進展するき裂はいくつか観察されたが, いずれも溶接部に 2mm 程度進展した後, 停留した. 図 2-17 にこれらのき裂の進展曲線を示す. なお, き裂長さの定義は図 2-18 に示す通りである.

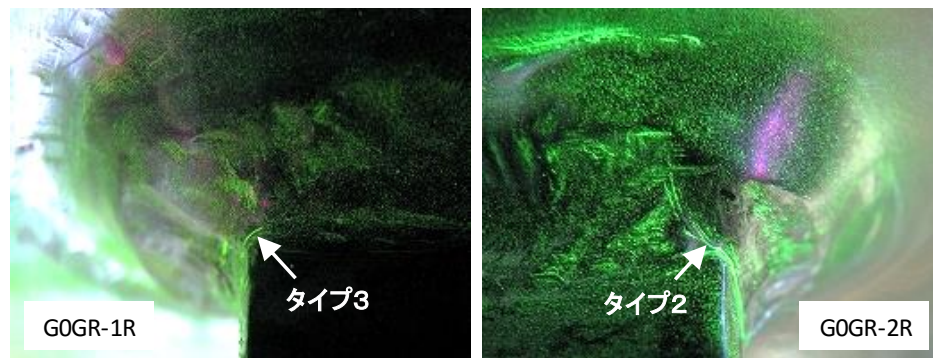


図 2-15 デッキ側止端のみ仕上げた試験体のタイプ 2, タイプ 3 のき裂

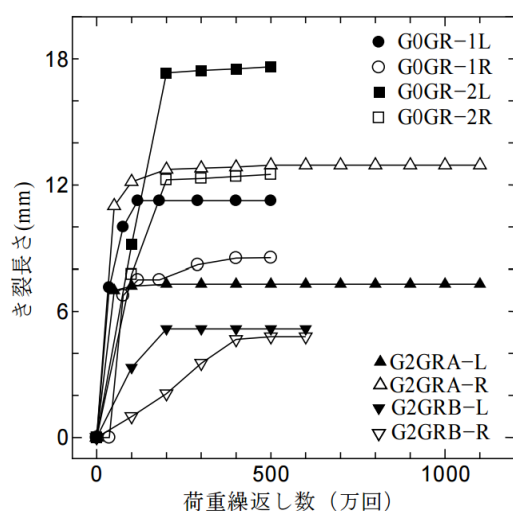


図 2-17 タイプ 2 と 3 のき裂進展曲線

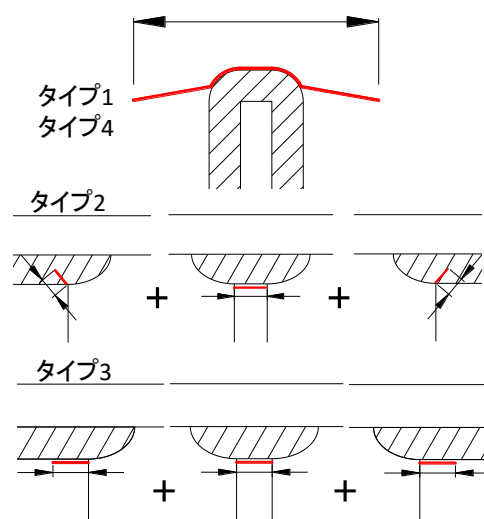


図 2-18 き裂長さの定義

G2GRB 試験体では，G2GRB 試験体はスティフナ側溶接止端も仕上げている．この試験体では，他の試験体と比べてき裂の進展が遅く，また停留したき裂の長さも短い．したがって，デッキ側止端と同様，スティフナ側止端についても仕上げによる疲労耐久性の向上が期待できるものと判断される．

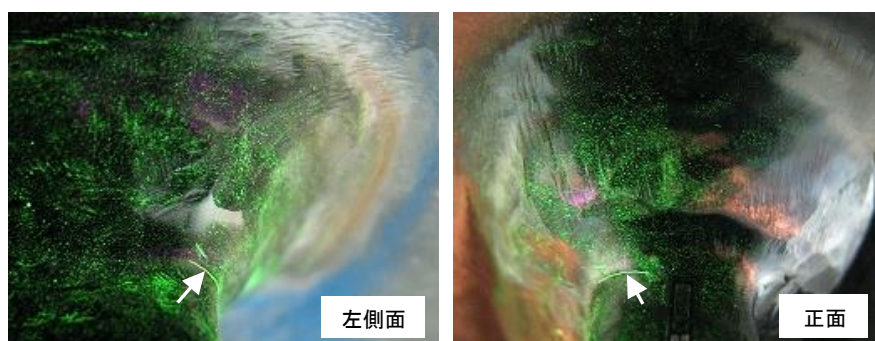


図 2-19 デッキ側・スティフナ側止端を仕上げた試験体のタイプ 3 き裂（G2GRB-R）

2.3.4 溶接部を切削した試験体の疲労試験結果

2.3.3 項までに示したように，溶接のままおよび溶接止端を仕上げた試験体ではタイプ 4 のき裂を再現することはできなかった．これは，これらの試験体の溶接が大きく，溶接ルート部の応力が低かったためとも考えられる．そのため，溶接部を切削し，溶接を小さくした試験体を準備した．

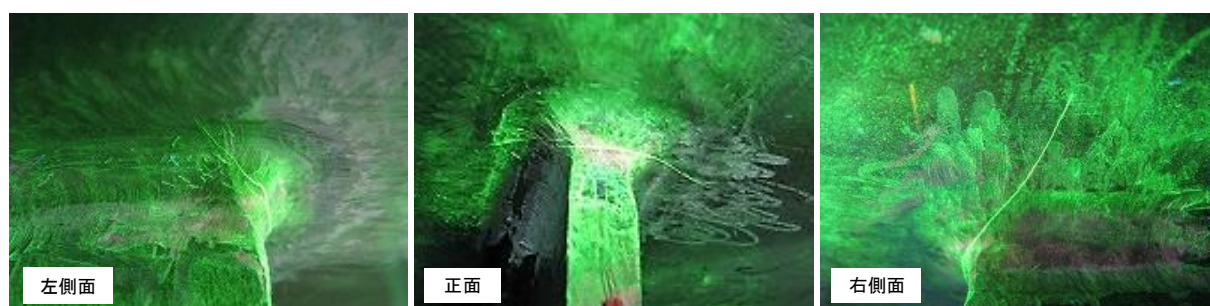
溶接部を切削した試験体の疲労試験結果を表 2-3 に示す．スティフナ側・デッキ側とも脚長が 2mm 程度となるように溶接部を切削した G1SG 試験体と 3mm 程度なるように切削した G2SGA-1 試験体では 500 万回の荷重繰返しを与えたが，疲労き裂の発生は認められなかった．G2SGA-2L と G2SGA-2R では，それぞれタイプ 1 とタイプ 4 のき裂が生じた．それらのき裂を図 2-11 に示す．G2SGA-2L のデッキ側溶接止端の曲率半径は 7mm 程度であったが，タイプ 1 の疲労き裂が生じた．G2SGA-2R でのき裂は溶接部表面に生じており，溶接ルート部から発生し，溶接部表面に進展したき裂と考えられる．

表 2-3 溶接部を切削した試験体の疲労試験結果

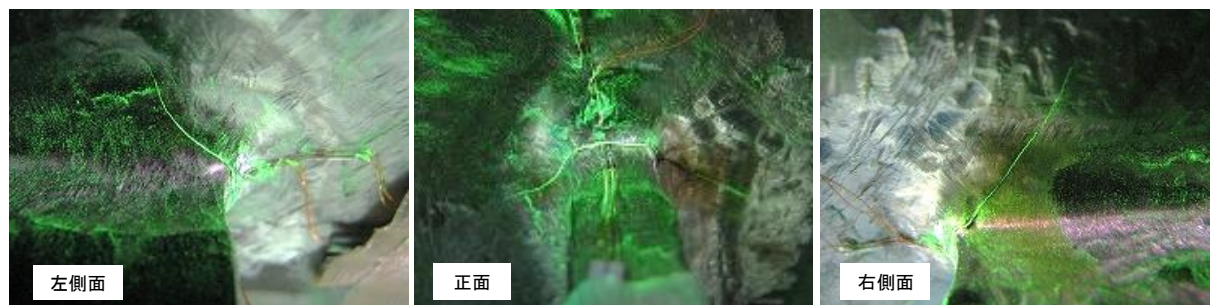
試験体	荷重繰返し数 (万回)	き裂タイプ	き裂長さ (mm)
G1SG-1L	500	なし	-
G1SG-1R		なし	-
G2SGA-1L	500	なし	-
G2SGA-1R		なし	-
G2SGA-2L	400	①	45.0
G2SGA-2R		④	45.5
G2SGB-1L	180	④	32.6
G2SGB-1R		④	32.0
G2SGB-2L	540	④	21.0
G2SGB-2R		④	63.0
G2SGB-3L	795	④	58.0
G2SGB-3R		④	38.8

スティフナ側の脚長を 3mm 程度，デッキ側の脚長を 5mm 程度となるように仕上げた 3 体の G2SGB 試験体では，すべての試験対象で図 2-20 に示すようなタイプ 4 の疲労き裂が観察された．これらの試験体の切断面と疲労破面の例を図 2-21 に示す．図 2-21(a)の左に示す切断面は，図 2-21(a)の右に示す疲労破面の中央に位置する切断面である．図 2-21(a)ではルートギャップの下部コーナーから回し溶接表面に進展したき裂とルートギャップ上部コーナー部から 1mm 程度離れた位置からデッキに進展するき裂が認められる．図 2-21(b)はこれらタイプ 4 のき裂面を示したものである．図 2-22 にタイプ 4 のき裂の進展曲線を示す．疲労き裂は，荷重繰返しの早期に発生し，急速に進展した後，進展速度が遅くなっている．

以上の切断面，疲労破面，進展曲線から，疲労き裂はルートギャップ下部コーナー部から発生し，溶接表面に達した後，溶接側面からデッキに進展したと推察される．

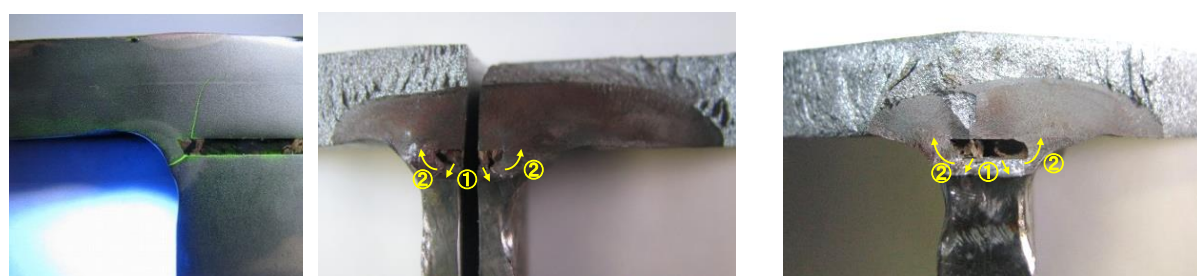


(a)G2SGA-2R



(b)G2SGB-1R

図 2-20 溶接部を切削した試験体で観察された疲労き裂の例



(a)G2SGA-2R

(b)G2SGB-1R

図 2-21 タイプ 4 の疲労き裂の例

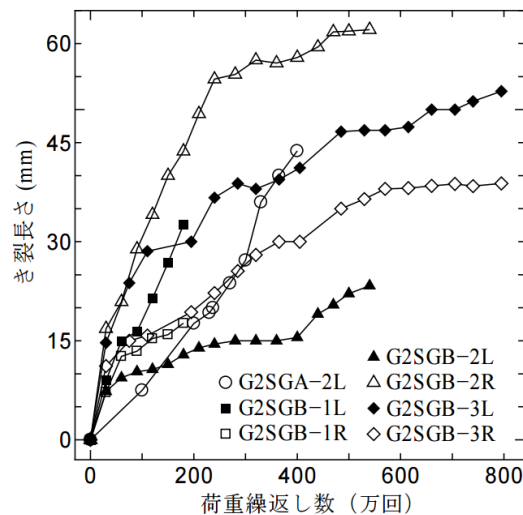


図 2-22 タイプ 4 のき裂進展曲線

2.4 試験体の応力解析

疲労試験においてき裂が発生した位置の応力性状を明らかにする目的で、試験体を対象に弾性 FEM 解析を行った。解析モデルの溶接形状一覧を表 2-4 に示す。なお、溶接のままの試験体モデルとしては、既報[3]で用いた溶接のままの試験体を対象とした。このモデルを OG0AW モデル（既報では NN）と記す。

応力解析のプリポストには FEMAP ver7.1，ソルバには CAEFEM ver6.0 を用いた。解析モデルは、対称性を考慮して 1/4 モデルとし、垂直スチフナの回し溶接部近傍をソリッド要素で、その他をシェル要素でモデル化したハイブリッドモデルである。ソリッド要素とシェル要素の結合は、ソリッド要素の側面に周りのシェル要素と同じ板厚のシェル要素を貼り付けることによって行った。要素寸法は着目部近傍（溶接止端・ルート部先端）で 0.1mm とした。载荷位置はデッキ上面中央の 50mm×100mm の範囲で、荷重は 20kN とし、拘束条件はウェブ直下をピン支持とした。解析に用いた弾性係数は 2.0×10^5 N/mm²，ポアソン比は 0.3 である。要素分割図の例を図 2-23 に示す。同図に示すように、溶接ルート部先端は矩形でモデル化している。

表 2-4 試験体解析モデルの溶接形状

モデル	脚長(mm)		止端半径(mm)	
	デッキ側	スチフナ側	デッキ側	スチフナ側
OG0AW	10.00	7.75	0.65	1.30
G0GR	9.70	8.80	5.30	1.20
G2GRA	8.65	8.43	5.22	1.34
G2GRB	8.13	6.74	5.75	4.37
G2SGA-1	3.57	3.45	8.80	10.30
G2SGA-2	2.90	3.00	7.16	8.82
G2SGB-1	5.29	2.80	7.83	7.91
G2SGB-2	5.18	2.94	6.34	6.61
G2SGB-3	4.82	2.83	5.00	5.85

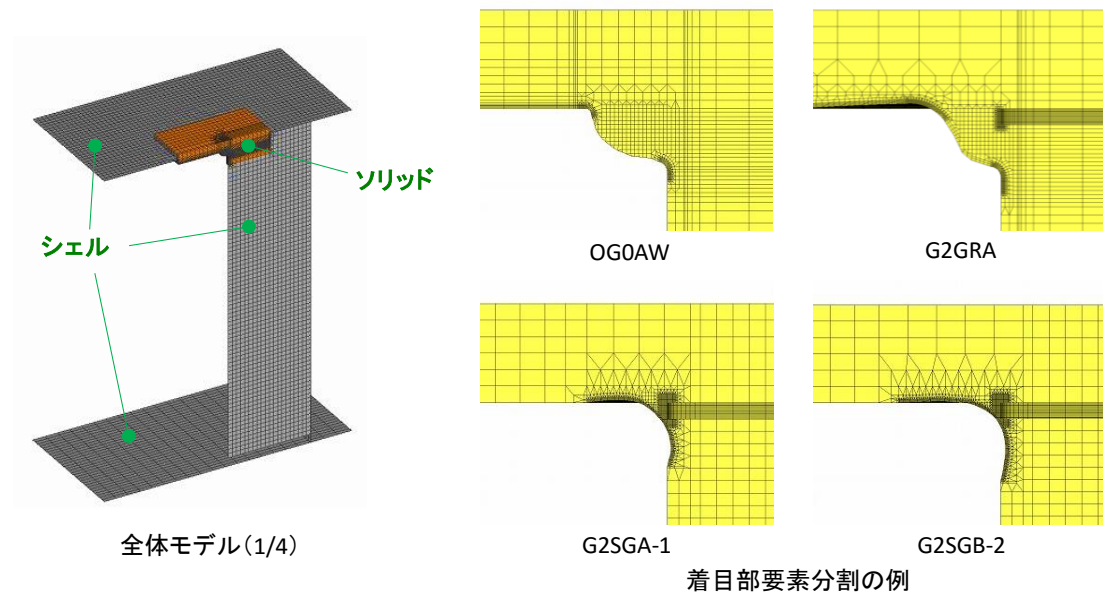


図 2-23 試験体モデルおよび着目部の要素分割図

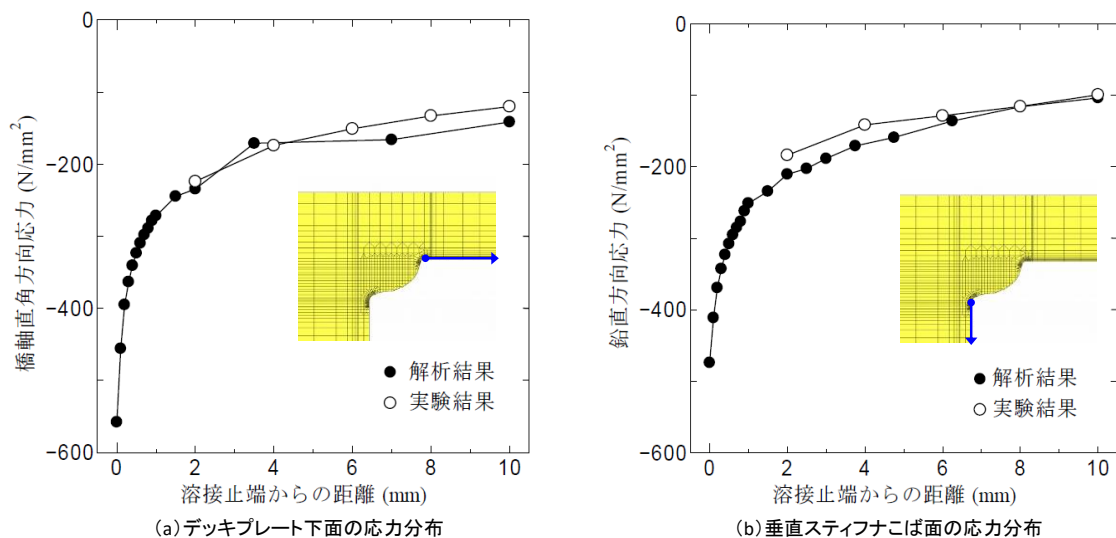


図 2-24 解析結果と実験結果の比較

OG0AW モデルについては、回し溶接部近傍のデッキ下面と垂直スティフナこば面で応力測定を行っている。図 2-24 にそれらの測定結果を応力解析結果とともに示す。解析結果は、節点応力を示している。解析結果は実験結果をよく再現しており、ここで用いた解析モデル・方法は妥当と考えられる。

表 2-5 に各試験体モデルの応力解析で得られたデッキ側止端、スティフナ側止端と溶接ルート部の最小主応力を示す。なお、これらは解析で得られた要素応力を示している。溶接止端を仕上げたモデル (G0GR, G2GR) のデッキ側溶接止端の応力は、溶接のままのモデル (OG0AW) のおよそ半分となっている。スティフナ側溶接止端も仕上げた G2GRB モデルのスティフナ側溶接止端の応力は、仕上げていない試験体モデ

ルのおよそ 75%となっている。このように、止端仕上げによる応力の低減が認められる。しかし、溶接部を切削した上で止端を仕上げた G2SG モデルのデッキ止端の応力は、止端半径が大きく改善されている（表 2-4 参照）にも関わらず、溶接のままの 80% 程度である。さらに、スティフナ側では、溶接のままの 1.5~2.3 倍となっている。このように、溶接止端の応力集中に対しては、止端半径だけではなく、溶接サイズの影響も大きい。

G2SG 試験体の多くで、疲労き裂が溶接ルート部から発生して溶接部を貫通した後、デッキに進展するタイプ 4 のき裂が観察されたが、それらの試験体モデルでの溶接ルート部の応力は、ルートき裂が観察されなかった G2GR モデルの 3~6 倍となっている。ただし、応力解析では高い応力集中が生じているが、疲労試験ではルートき裂の発生は認められなかった G2SGA-1 試験体、デッキ側溶接止端からき裂が生じた G2SGA-2 試験体 L 側の例もある。なお、ここで示す応力は非常に大きく、降伏応力をはるかに超えている。これは、弾性解析を行っているため、またルート先端形状を矩形でモデル化しているためである。したがって、これらの応力の値は参考にすぎないが、相対比較は可能と考える。

図 2-25 に G0GR モデルの応力解析で得られたスティフナ幅方向（橋軸直角方向）のスティフナ側溶接止端に沿った応力分布を示す。スティフナこぼ面では高い応力集中が生じているものの、その値はこぼ面から離れるにしたがって急激に減少し、3mm 程度離れた位置で半減、そして 25mm 程度離れた位置ではほぼ 0 となっている。このような応力分布の特徴が、疲労試験においてスティフナ側溶接止端から発生したき裂が停留した原因の一つと考えられる。

表 2-5 試験体モデルの応力解析結果

モデル	デッキ側止端 (N/mm ²)	スティフナ側止端 (N/mm ²)	ルート (N/mm ²)
OG0AW	-667	-624	-
G0GR	-356	-593	-
G2GRA	-368	-633	-642
G2GRB	-324	-469	-869
G2SGA-1	-526	-975	-2778
G2SGA-2	-435	-1104	-3547
G2SGB-1	-595	-1276	-3783
G2SGB-2	-542	-1264	-3552
G2SGB-3	-624	-1428	-4170

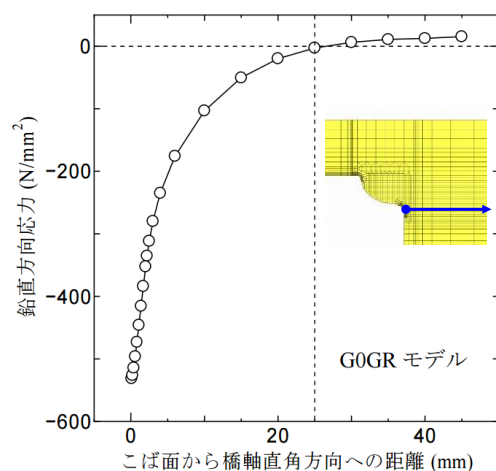
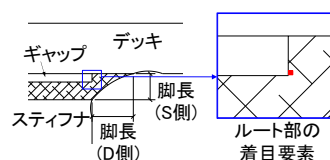


図 2-25 垂直スティフナ溶接線に沿う応力分布

2.5 溶接サイズとギャップがルート部の応力に及ぼす影響

ここでは、溶接の脚長比（スティフナ側／デッキ側）を $1/1 \cdot 1/1.5 \cdot 1/2 \cdot 1/2.5 \cdot 1/3$ の 5 種類、スティフナ側の溶接脚長を $3 \cdot 4 \cdot 6\text{mm}$ の 3 種類、ギャップサイズを $1 \cdot 2 \cdot 3\text{mm}$ の 3 種類を組み合わせた計 40 のモデルを対象として、ルート部の応力解析を行う。溶接は直角三角形でモデル化しており、溶接のルート部への溶け込みは 0 としている。解析条件は 2.4 節と同じである。

図 2-26 にルート部の最小主応力とギャップサイズの関係を示す。ギャップサイズが大きく溶接サイズが小さいほどルート部に高い応力が生じている。また、脚長比が大きい場合にルート部の応力が高くなっているような傾向も認められるが、脚長比がルート部応力に及ぼす影響は、ギャップサイズや溶接サイズの影響に比べて小さい。図 2-27 はルート部の応力をのど厚で整理した結果を示している。溶接部のギャップサイズや不等脚を考慮するため、ここでののど厚は図中に示すように定義している。図中には試験体モデルの解析結果も示している。のど厚が小さいほどルート部の応力は大きく、この応力とのど厚の関係は 1 つの曲線で表すことができる。したがって、溶接脚長や脚長比、ルートのギャップサイズによらず、ルート部の応力のはのど厚で整理できると考えられる。

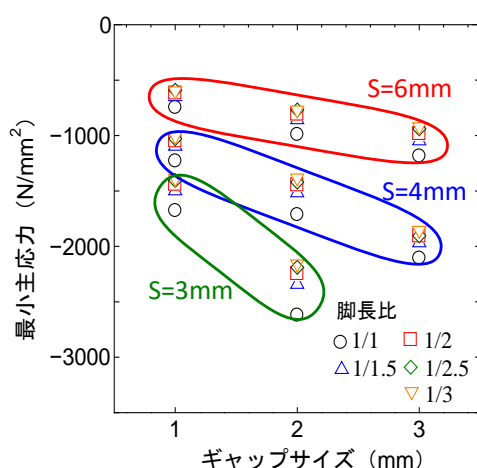


図 2-26 ルート応力とギャップサイズの関係

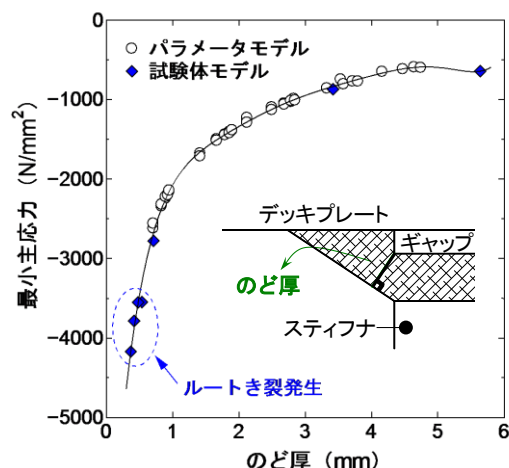


図 2-27 ルート応力とのど厚の関係

2.6 き裂深さとひずみ範囲減少率の関係

図 2-12 に示したデッキ側溶接止端のき裂深さとひずみ範囲減少率の関係を解析的にも明らかにする目的で、き裂を導入した G0AW 試験体の応力解析を行った。

解析モデルは 2.4 節と概ね同じであるが、き裂を導入するデッキ側溶接止端近傍の最小要素寸法は 0.2mm としている。载荷位置・拘束条件も 2.4 節と同じである。なお、デッキ側の脚長と止端半径は 9.3mm と 0.6mm 、スティフナ側の脚長と止端半径は 6.0mm と 1.2mm としている。図 2-28 にデッキ側溶接止端に導入したき裂の形状を示す。き裂は橋軸方向および鉛直方向に直線の半楕円形で、回し溶接の中央部に配置した。深さを a 、長さを $2b$ とし、き裂深さ a ($1\sim 8\text{mm}$) とアスペクト比 a/b ($1.0\sim 0.25$)

を変えた 12 パターンである．これらの解析においては，き裂面の接触は考慮していない．また，き裂のない状態での解析も行っている．このようなモデルの応力解析を行い，溶接止端から 5mm 離れたデッキ下面のひずみを求め，き裂深さとひずみ範囲減少率の関係を求めた．

解析結果を図 2-29 に示す．き裂が深くなるにしたがって，ひずみ範囲減少率も大きくなっている．また，同じき裂深さであれば，き裂のアスペクト比が小さい（き裂長さが大きい）場合にひずみ範囲減少率が大きくなっている．図中には，実験から得られたき裂深さとひずみ範囲減少率の関係も示している．き裂が浅い場合，解析結果は実験とほぼ一致しているものの，き裂が深くなるにしたがって，解析結果は実験結果よりもひずみ範囲減少率が高くなっている．これは，デッキ側溶接止端に作用する繰返し応力は圧縮であるが，き裂が浅い場合には溶接止端の引張残留応力の影響でき裂が開いた状態になり，またき裂が深くなると引張残留応力の効果が小さくなり，き裂面が閉じるためと考えられる．このことは，図 2-11 に示したように，き裂が浅い場合（G0AW-1, 2）の疲労破面にさびの存在は認められないものの，深い場合（G0AW-3, 4, 5）にはき裂面の擦れにより生じるさびが顕著となっていることから推察される．

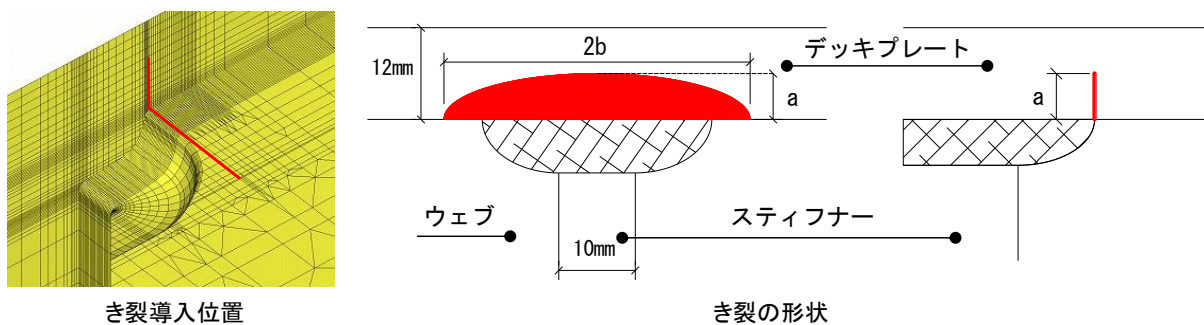


図 2-28 解析モデルに導入したき裂の形状

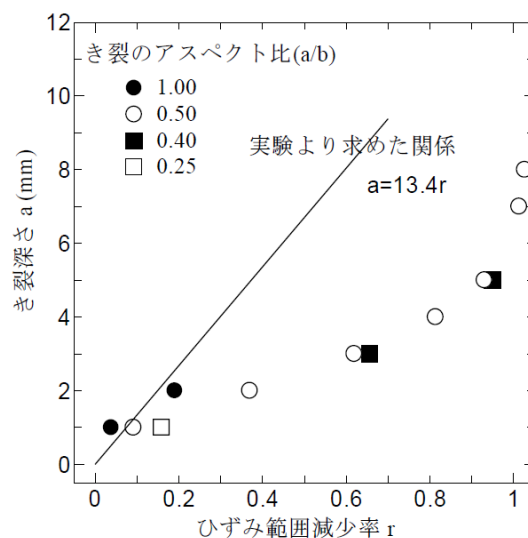


図 2-29 解析によるき裂深さとひずみ範囲減少率の関係

2.7 有効切欠き応力を用いた疲労破壊起点の検討

国際溶接学会（IIW）の疲労設計指針では、公称応力とホットスポット応力に加え、Effective Notch Stress（有効切欠き応力）を用いた疲労強度評価法が示されている[5]。有効切欠き応力とは、き裂発生点（溶接止端、溶接ルート）に円弧状の切欠きを設け、その円形切欠き壁の応力（有効切欠き応力）を用いて疲労強度評価を行うものである。また、円の半径は溶接のままの止端およびルート部については1.0mmとされている。

ここでは、有効切欠き応力の概念を用いて、鋼床版デッキ垂直スティフナ溶接部の疲労き裂起点（デッキ側溶接止端、スティフナ側溶接止端、溶接ルート）がどのような条件によって決まるかについて検討する。すなわち、溶接サイズ、脚長比とギャップサイズをパラメータとした溶接部モデルを対象として、各部位の有効切欠き応力を求め、比較する。

解析対象、解析方法と解析条件は2.6節と同じある。溶接部は三角形でモデル化し、溶接のルート部への溶け込みは0としている。溶接サイズは3~8mm（5種類）、脚長比は1/1~1/2（3種類）、ギャップサイズは1~3mm（3種類）としている。これらを組み合わせた36モデルの応力解析を行った。ここで用いる溶接部モデルの一覧を表2-6に、要素分割図の例を図2-30に示す。ルートに設けた円形切欠きの周は、き裂発生点である下側のルート先端コーナー部と一致するように設置している。有効切欠き応力を求める位置近傍の要素の大きさは0.1mmである。

図2-31にデッキ側溶接止端の有効切欠き応力とデッキ側溶接脚長の関係を示す。溶接脚長が小さいほど応力が大きくなっている。ただし、脚長が10mm程度以上となると、脚長に伴う応力の変化は小さくなっている。同じ溶接脚長であれば、脚長比（スティフナ側／デッキ側）が大きいほうが、高い応力が生じている。ギャップサイズによる応力集中の変化はほとんどない。

表 2-6 有効切欠きを用いたモデルの溶接形状

溶接脚長(mm)		脚長比	ギャップサイズ(mm)		
スティフナ側	デッキ側		1.0	2.0	3.0
3.0	3.0	1/1	○	○	
	4.5	1/1.5	○	○	
	6.5	1/2	○	○	
4.0	4.0	1/1	○	○	○
	6.0	1/1.5	○	○	○
	8.0	1/2	○	○	○
5.0	5.0	1/1	○	○	○
	7.5	1/1.5	○	○	○
	10.0	1/2	○	○	○
6.0	6.0	1/1	○	○	○
	9.0	1/1.5	○	○	○
	12.0	1/2	○	○	○
8.0	8.0	1/1	○		
	12.0	1/1.5	○		
	16.0	1/2	○		

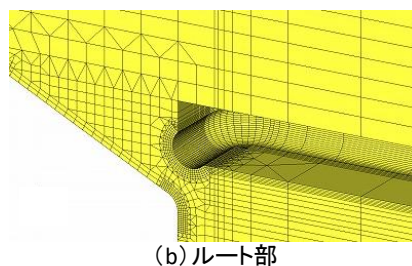
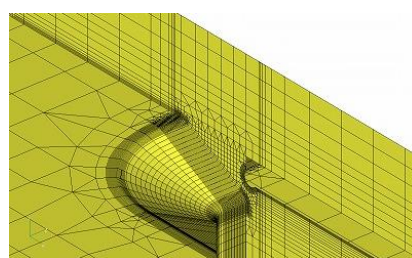


図 2-30 有効切欠きの要素分割

図 2-32 はスティフナ側溶接止端の有効切欠き応力とスティフナ側溶接脚長の関係を示したものである。溶接脚長が小さいほど応力が高い。また、ギャップサイズが大きいほど応力も大きくなっており、特に脚長が小さい場合にギャップサイズによる応力の差が大きい。

図 2-33 にスティフナ側止端、デッキ側止端とルート部の有効切欠き応力をのど厚で整理した結果を示す。いずれの位置の応力も、のど厚が大きくなるにしたがって小さくなっているが、その変化はルート部で大きく、次いでスティフナ側止端の順である。のど厚が 1mm 未満の場合にはルート部の応力が最も大きく、2mm 以上ではスティフナ側止端の応力が最も大きい。また、のど厚が 4mm 程度以上となると、ルート部に比べてデッキ側溶接止端の応力が高くなってきている。したがって、溶接ルート部が疲労き裂の起点となるのは、のど厚が極端に小さい（ギャップサイズが大きく、溶接サイズが小さい）特殊な場合に限られると推察される。また、のど厚が 2mm 以上では、スティフナ側溶接止端が疲労き裂の起点となりやすいと考えられるが、図 2-25 に示したようにスティフナ幅方向では応力が急激に低減するために、本試験および実橋においてデッキ側のき裂が観察されるものと考えられる。

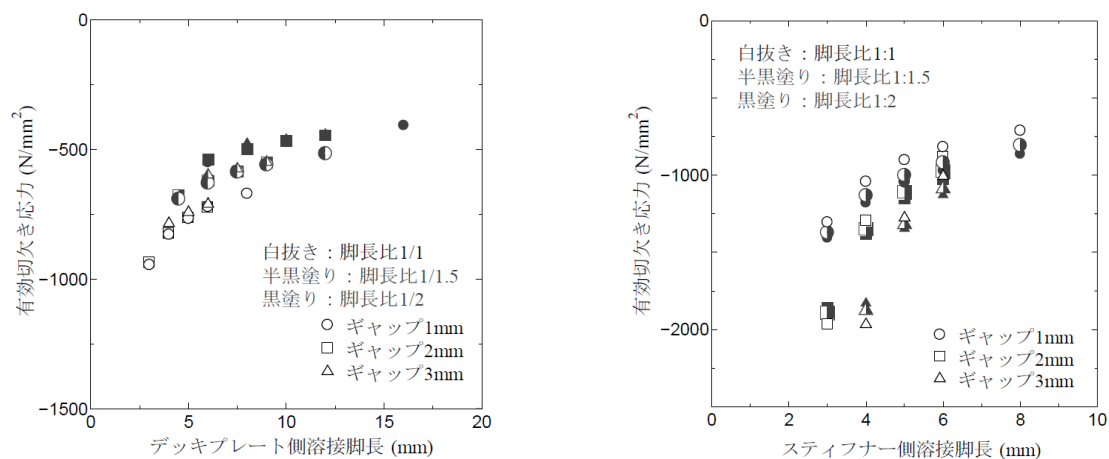


図 2-31 デッキ側止端の有効切欠き応力 図 2-32 スティフナ側止端の有効切欠き応力

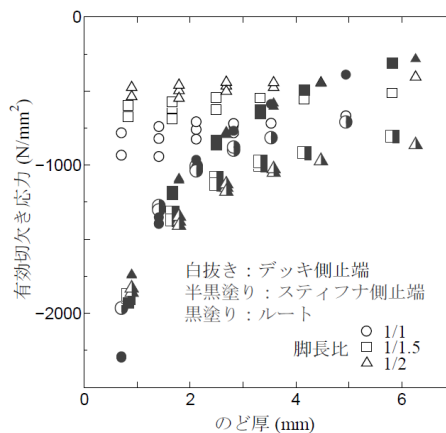


図 2-33 各位置の有効切欠き応力の比較

2.8 まとめ

本章では、実橋で発生しているき裂の再現と、それらのき裂の深さ方向の進展挙動を明らかにすることを目的に、小型試験体を対象に溶接形状・寸法とルートギャップをパラメータとした疲労試験と応力解析を行った。さらに、疲労破壊起点（デッキ側止端、スティフナ側止端、溶接ルート）がどのような条件で決まるかを有効切欠き応力の概念を用いて検討した。ここで得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 小型試験体の疲労試験を行い、実橋で報告されている疲労き裂を再現した。ただし、タイプ2のき裂は溶接部を斜め上方に2mm程度進展した後に停留した。
- (2) 溶接のままの試験体では、試験開始直後にデッキ側とスティフナ側溶接止端にき裂が生じる。その後、デッキ側に発生したき裂は深さ方向に荷重繰返し数とほぼ比例して進展し、深さが8mm程度以上になると停留する傾向が認められた。スティフナ側溶接止端のき裂もある程度進展すると停留した。
- (3) スティフナこば面の溶接止端には高い応力集中が生じるものの、こば面から離れるにしたがって応力は急激に低下し、こば面から橋軸直角方向へ25mm程度離れると応力はほぼ0となる。スティフナ側溶接止端のき裂がある程度進展した後に停留した原因の一つに、このような応力分布が考えられる。
- (4) デッキ側の曲率半径を5mm以上で仕上げることで、溶接のままに比べて応力は半減し、スティフナ側も5mm程度で仕上げることで約75%程度まで低減する。このことから止端を仕上げることで疲労耐久性の大幅な向上が期待できる。ただし、溶接サイズが極端に小さい場合には仕上げの効果は小さく、特にスティフナ側では仕上げた止端の応力が溶接のままの状態よりも大きくなることもある。
- (5) 溶接ルート部の応力はその厚が小さいほど大きくなり、溶接形状によらずその応力はその厚で整理できる。
- (6) 溶接ルート部が疲労破壊の起点となるのは、溶接脚長が小さく、ルートギャップが大きい、すなわち溶接のその厚が極端に小さい場合である可能性を示した。通常の溶接の大きさおよびルートギャップであれば、溶接止端が疲労破壊起点となることを有効切欠き応力の概念を用いて示した。

このように、溶接の形状・寸法およびルートギャップが疲労き裂の発生起点や進展性状に影響することが明らかとなったが、ここに示した結果は、デッキと垂直スティフナの溶接部を大胆に模擬した試験体の検討から得られたものであり、荷重の載荷位置も限定したものである。ここで着目した3つの疲労破壊起点（デッキ側止端、スティフナ側止端、ルート部）の応力は、輪荷重の載荷位置やUリブと垂直スティフナの間隔などの構造ディテールにも大きな影響を受けると考えられ、本検討においてスティフナ側止端のき裂が停留したのも、これらの条件が限定的であったことに起因している可能性がある。これらの影響を明らかにするためには、実際の鋼床版に近いモデルで荷重位置を変化させた検討を行う必要があると考えている。

第3章,第4章では、本章で用いたものと同じ小型試験体を用いて、その主たるき裂であるデッキ側止端のき裂（タイプ1）に着目して検討を行う。

【参考文献】

- [1] 神木剛，下里哲弘，弓削太郎：鋼床版箱桁ウェブの垂直補剛材溶接部の疲労対策検討，土木学会第 60 回年次学術講演会，I-398，2005.
- [2] 高田佳彦，平野敏彦，坂野昌弘：阪神高速道路における鋼床版の疲労損傷状況報告，土木学会第 61 回年次学術講演会，1-535，2006.
- [3] 森猛，原田英明，大住圭太，平山繁幸：鋼床版垂直スティフナ溶接部に生じる疲労き裂の補修・補強方法，鋼構造論文集，Vol.18, No.69，pp.51-59，2011.
- [4] 原田英明，森 猛，内田大介，川崎靖子：鋼床版デッキ・トラフリブ・横リブ交差部のデッキ貫通き裂の発生・進展性状に対するデッキ厚とスカラップの影響，鋼構造論文集，Vol.19，No.73，pp.65-74，2012.
- [5] Hobbacher, A. : IIW Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, WRC Bulletin 520, The Welding Research Council, New York, 2009.

第3章 溶接止端に留まるき裂に対するUITの効果

3.1 はじめに

図3-1に示すような磁粉探傷試験で観察される指示模様の先端が溶接止端に留まる場合には、疲労き裂による指示模様ではなく、鋭い止端形状による疑似模様のことも多く、観察のみでき裂の有無を判断することは難しい。そのため、垂直スティフナ上端で溶接止端に沿う指示模様が発見された場合には、き裂の有無の判断と併せて、切削によるき裂の除去が行われることが多い。

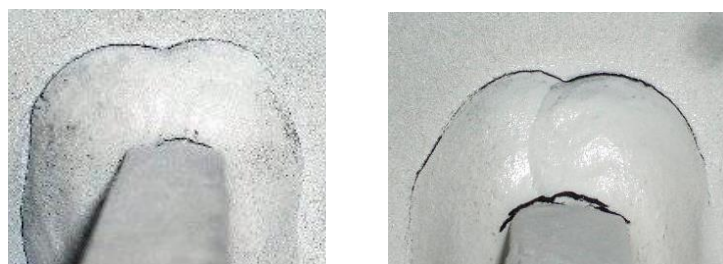


図 3-1 先端が溶接止端に留まる指示模様の例

切削でき裂が除去された場合には、止端仕上げを行い措置を完了する。第2章では止端仕上げの効果を明らかにしたが、一方で先端が溶接止端に留まるき裂であっても、深さが4mm程度まで進展している場合があることが明らかとなった。き裂が深い場合には、デッキの減厚が大きくなることによるき裂の再発生が懸念される。また、切削除去に要する作業時間が長くなるうえに、き裂の先端が除去しきれない場合には、そこからすぐにき裂が進展することもある。そのため、き裂の切削除去に代わる簡易で効果の高い補修方法を確立することは、維持管理の効率化やコスト縮減に有用である。

近年、垂直スティフナ上端にICR処理[1]を適用することが検討されている[2,3]。しかし、き裂の近傍にピーニングを施すICR処理では作業が難しくなることが考えられる。そこで、き裂の上から直接打撃を与えるピーニング工法を適用すれば、切削除去やICR処理に比べ、簡易な施工でより高い効果が得られる可能性があると考えた。また、ピーニング工法には、施工時の取扱いが容易で、溶接止端部に生じるき裂に対しても直接打撃を与えることができるUITを用いることとした。なお、UITはその他にも処理速度が速い、騒音が小さい、装置の運搬が可能、比較的深い範囲まで圧縮残留応力が導入できるなどの利点を有するとされている。

本章では、溶接止端に留まる段階のき裂の補修において、き裂の上から直接UIT[4]を適用する効果について、小型試験体の疲労試験、応力解析、切断法による残留応力測定、UIT施工前後のひずみ変化の測定を行い検討した。

3.2 試験体

試験体は、第 2 章（図 2-6）で用いた試験体と同じ、垂直スティフナ取り付け部を模擬した小型試験体である。試験体数は 10 で、No.1～7 の 7 体は疲労試験，No.8～10 の 3 体は切断法による残留応力測定に用いた。1 体の試験体にデッキと垂直スティフナの接合部が 2 箇所あるため、図 2-6 に示すようにこれらを L・R と区別している。

疲労試験前に試験体の回し溶接部の溶接脚長と止端曲率半径を測定した。測定は、親水性ビニールシリコン印象材で溶接部を型取りし、垂直スティフナ板厚中心近傍から 2mm 程度の厚さに 4 枚を切り出し、拡大投影機で 10 倍に拡大した状態で行った。これらの測定値の平均を表 3-1 に示す。

表 3-1 試験体の溶接形状

試験体		脚長(mm)		止端半径(mm)	
		デッキ側	スティフナ側	デッキ側	スティフナ側
No.1	L	9.0	5.7	0.9	0.8
	R	8.9	5.5	0.6	1.0
No.2	L	8.1	6.0	0.7	0.9
	R	8.9	5.2	1.1	0.9
No.3	L	8.4	6.4	0.7	1.1
	R	9.0	5.9	1.3	1.0
No.4	L	8.9	6.0	0.8	1.3
	R	8.1	6.0	0.9	1.2
No.5	L	9.0	5.5	0.9	0.9
	R	9.4	5.5	1.1	1.0
No.6	L	9.0	6.1	0.9	1.0
	R	9.2	5.8	1.6	1.0
No.7	L	8.6	5.3	1.6	1.1
	R	8.2	7.3	0.4	1.5
No.8	L	9.2	5.8	1.2	0.9
	R	10.2	5.7	1.8	1.3
No.9	L	8.9	6.3	1.8	1.7
	R	9.8	6.1	1.7	1.6
No.10	L	9.9	5.5	0.9	0.7
	R	8.7	5.9	1.2	1.1

3.3 疲労試験

3.3.1 疲労試験の方法

(1) 疲労試験の条件

動的能力 200kN の電気油圧サーボ式材料試験機を用いて疲労試験を行った。載荷位置は図 2-6 に示すデッキ上面の中央部 50mm×100mm の領域とし、荷重範囲 30kN (0.3kN-30.3kN) を 5Hz で与えた。支点としたウェブ直下に鋼製丸棒を設置した。

(2) 疲労試験の種類

7 体の試験体に対して疲労試験を行った。No.1 は溶接のままの状態です UIT を施工した試験体、No.2～7 の 6 体は疲労き裂を導入したうえで UIT を施工した試験体である。No.2～7 試験体では、まず溶接のままの状態です疲労試験を行うことで疲労き裂を導入し、き裂が所定の深さに達したと判断した時点で、疲労試験を中止して、試験体の溶接止端に UIT を施工した。その後、UIT による補修効果を調べるために疲労試験を再開した。

(3) 導入するき裂の深さ

本研究では、デッキ母材に進展する前の溶接止端に留まる段階のき裂に対する UIT の効果を検討する。第 2 章より、本試験条件においてスティフナ側止端のき裂は停留することが明らかとされているため、本章ではデッキ側止端のき裂を主な検討対象とする。また、第 2 章で得られた G0AW 試験体の疲労破面から、き裂の深さが 4mm 程度までであれば、き裂先端がデッキ母材にまで進展せずに溶接止端に留まると考えられたため、4mm 以下で深さを変えたき裂を導入することとした。

導入するき裂の深さは、第 2 章で明らかにした溶接止端から 5mm 離れた位置のひずみ範囲減少率 r とき裂深さ a の関係から推定した。ひずみ範囲減少率 r の定義は式(1)、ひずみ範囲減少率 r とき裂深さ a の関係は式(2)のとおりである。

$$r = \frac{\text{初期ひずみ範囲} - \text{ひずみ範囲}}{\text{初期ひずみ範囲}} \quad (1)$$

$$a = 13.4r \quad (2)$$

図 3-2 にひずみゲージ貼付位置を示す。ここで用いた試験体の主たる疲労き裂はデッキ側止端に生じるため、デッキ側止端を対象に、試験対象 1 個所に対して左,中,右の 3 枚のゲージを貼付している。なお、ひずみゲージはゲージ長 2mm の 1 軸ゲージである。第 3 章ではまわし溶接部の中央（図 3-2 に示す中）のひずみ範囲減少率 r とき裂深さ a の関係を求めたが、比較的浅い段階のき裂は、溶接止端に沿ってどの位置で最も深くなるか不明のため、左・右に対しても式(1)、式(2)からき裂深さを推定した。

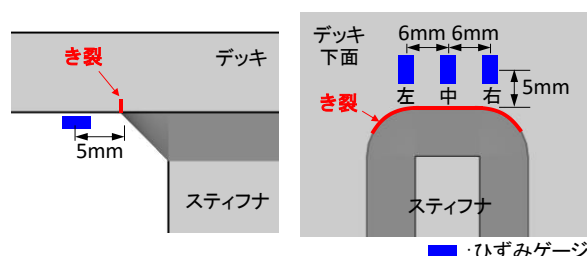


図 3-2 ひずみゲージ貼付位置

(4) UIT の施工

UIT では溶接止端部を打撃し、塑性変形させることで、溶接による引張残留応力を軽減させる。き裂がない状態で UIT を施工した場合、図 3-3 に示すように、UIT により生じる溶接止端の塑性変形部を、その周囲が拘束することで圧縮残留応力が発生し疲労寿命が向上する。き裂がある状態で UIT を施工した場合には、図 3-4 に示すように、き裂の一部あるいは全面が閉口することで、き裂先端部の応力集中が緩和されると考えられる。

UIT は米国 Progress Rail Services Corporation 社の UIT-ESONIX[®]27 UIS[4]を用いて行った。装置はジェネレーター、ハンドツール、冷却装置からなる。図 3-5 に装置とピンの先端形状を示す。ピンの直径は 3mm で、その先端部は 3mm の曲率半径を有している。溶接止端部に押し当てやすいように、ピンはハンドツールの主軸方向に対して斜めに取り付けられている。

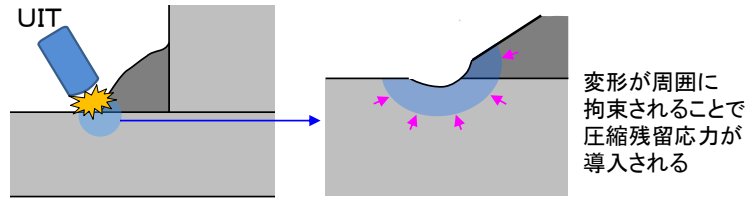


図 3-3 UIT による圧縮残留応力の導入イメージ

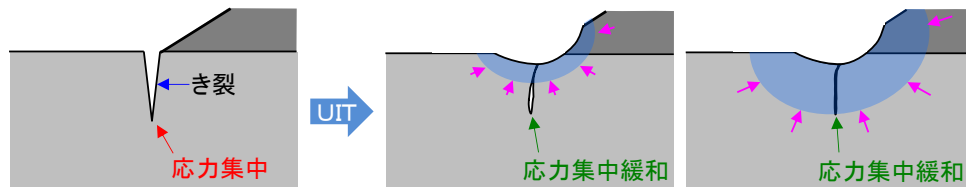


図 3-4 UIT によるき裂の閉ロイメー



図 3-5 UIT 装置およびピンの形状

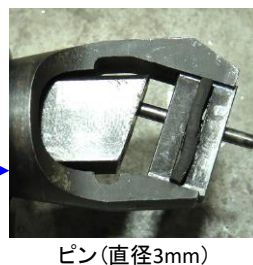


図 3-6 UIT の施工状況

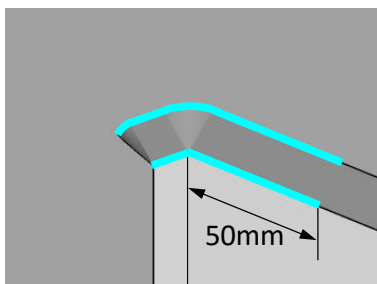


図 3-7 UIT の施工範囲



図 3-8 UIT 施工前後の磁粉探傷試験

既設橋梁の垂直スティフナに UIT を適用する場合には上向き姿勢で施工することになるが、本研究では UIT を適切に施工した場合の効果を検証するために、図 3-6 のような下向きの姿勢で施工した。UIT の施工範囲は、図 3-7 に示す、まわし溶接とまわし溶接から 50mm の範囲のデッキ側および垂直スティフナ側止端とし、き裂の上から UIT を施した。その際、両止端の UIT 施工の順序に規則は設けなかった。図 3-8 は UIT 施工前後に磁粉探傷試験を行った状況の例を示している。UIT の施工は、溶接止端の谷線に沿ってピンを押し付けて打撃を行い、溶接止端の谷線が消える程度の溝を形成するのが一般的である。本検討においても溶接止端の谷線が消える程度まで UIT を施工した。なお、UIT 施工後に実施した磁粉探傷試験では、明確ではないものの、UIT

施工部にき裂によるものと思われる指示模様が観察されることもあった。

図 3-9 に示す UIT 施工後の凹み深さと曲率半径を 3.2 節で示した溶接止端形状と同様の手順で測定した。測定結果を表 3-2 に示す。打撃深さは 0.05mm～0.53mm，曲率半径は平均で 2.1mm であり，デッキ側とスティフナ側でこれらの値に明確な差は認められない。

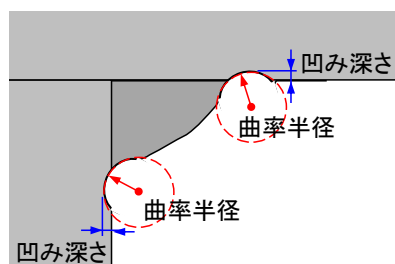


図 3-9 凹み深さと曲率半径

表 3-2 UIT 後の溶接止端部の凹み形状

試験体		凹み深さ(mm)		曲率半径(mm)	
		デッキ側	スティフナ側	デッキ側	スティフナ側
No.1	L	0.36	0.30	1.8	2.4
	R	0.43	0.22	2.2	2.2
No.2	L	0.09	0.23	1.7	1.7
	R	0.11	0.31	2.8	2.3
No.3	L	0.50	0.21	2.9	2.4
	R	0.53	0.16	2.4	2.0
No.4	L	0.19	0.18	2.3	1.9
	R	0.16	0.24	2.3	2.2
No.5	L	0.06	0.15	1.8	1.9
	R	0.10	0.16	2.0	1.7
No.6	L	0.17	0.24	1.5	2.4
	R	0.29	0.30	1.9	2.3
No.7	L	0.24	0.06	2.4	2.0
	R	0.38	0.05	2.3	1.6
No.9	L	0.23	0.25	2.4	2.1
	R	0.24	0.28	2.7	2.1
No.10	L	0.21	0.22	2.0	1.9
	R	0.24	0.23	2.1	1.8

3.3.2 疲労試験結果

(1) 溶接のままの状態での UIT を施工した試験体

No.1 試験体では，溶接のままの状態での UIT を施工し，荷重繰返し数 1000 万回の疲労試験を行った。疲労試験終了後に磁粉探傷試験を行ったが，デッキ母材やビード表面にき裂は観察されなかった。図 3-10 にそれらの様子を示す。疲労試験中に測定されたひずみ範囲も，L 側で 2%程度，R 側で 3%程度の変化であり，き裂は発生しなかったと推定された。

き裂の発生の有無をより詳細に調べるため，図 3-11 に示すように，まわし溶接部近傍を切り出し，さらに垂直スティフナの板厚中心で切断して，その断面を磁粉探傷試験により観察した。図 3-12 に断面観察の結果を示す。L,R とも，デッキ側止端のき裂は生じておらず，スティフナ側止端のき裂もその深さは 1～2mm 程度である。しかし，

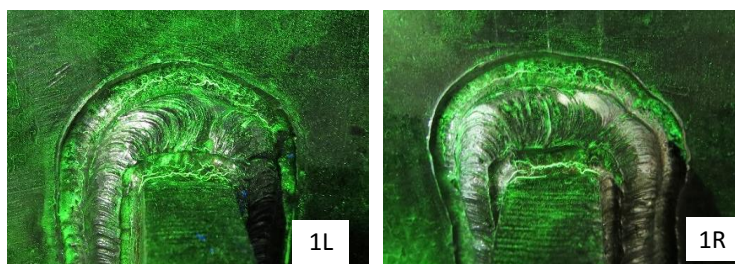


図 3-10 溶接のままの UIT を施工した試験体の磁粉探傷試験

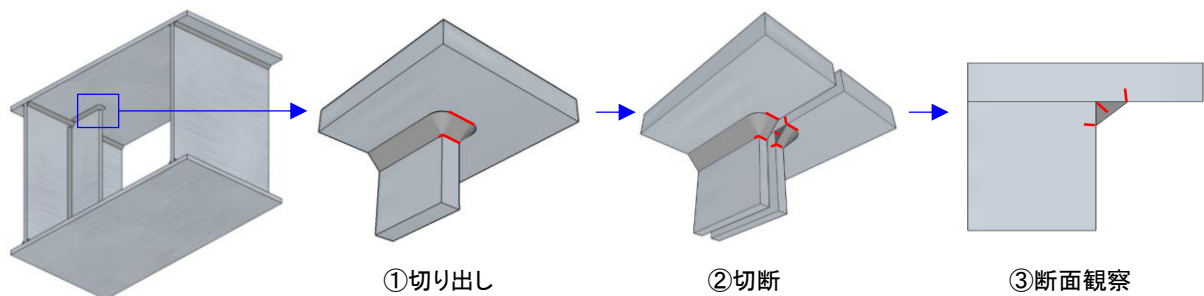


図 3-11 断面観察のための加工手順



図 3-12 溶接ままで UIT を施した試験体の断面観察 図 3-13 ルートき裂の疲労破面

両側とも溶接ルートから発生して溶接ビード表面に進展するき裂が発生しており，R 側では未溶着部からデッキに進展するき裂も観察される．ルートき裂の進展性状を調べるために疲労破面を暴露した結果を図 3-13 に示す．き裂はルート部から溶接ビードに発生・進展し，その後，デッキと溶接が一体となっている部分を介してデッキに進展し，垂直スティフナ直上まで回りこんでいる．図 3-12 の観察断面において未溶着部からのき裂が観察されたのは，このような進展性状によるものである．

(2) き裂を導入したうえで UIT を施工した試験体

表 3-3 に UIT 施工前に与えた荷重繰返し数と，図 3-2 の左,中,右のひずみを用いて式(1)，式(2)より算出したデッキ側止端のき裂の推定き裂深さを示す．表 3-3 のハッチングは各試験対象における推定き裂深さの最大個所を示している．き裂を導入するための疲労試験では，5.3～41.2 万回の繰返し荷重を与えることで推定き裂深さ 0.4mm～4.0mm のき裂を導入した．なお，UIT 施工前には磁粉探傷試験を行い，いずれのき裂先端もデッキ母材には進展しておらず，溶接止端に留まっていることを確認した．

UIT 施工後は，500～1000 万回の繰返し荷重を与えた．疲労試験終了後，溶接のままで UIT を施工した試験体と同様に，デッキ下面からの磁粉探傷試験，垂直スティフナの板厚中心断面の磁粉探傷試験（断面観察），疲労破面の観察を行った．表 3-3 に，デッキ下面からの磁粉探傷試験と断面観察の結果も併せて示す．断面観察におけるき裂長さの定義は図 3-14 に示すとおりである．図 3-15 には磁粉探傷試験で観察された

表 3-3 疲労き裂を導入したうえで UIT を行った試験体の疲労試験結果

試験体	試験部位	UIT施工前(き裂の導入)				UIT施工後						
		荷重繰返し数 (万回)	推定き裂深さ(mm)			荷重繰返し数 (万回)	デッキ下面から観察されたき裂		スティフナ板厚中心断面で観察されたき裂長さ(mm)			
			左	中	右		デッキへの 進展	溶接ビード の貫通	デッキ側 止端	スティフナ 側止端	ルート→ ビード表面	ルート→ デッキ
No.2	2L	10.0	0.0	0.4	1.6	500	-	-	0.6	0.5	4.8	-
	2R		0.1	0.4	1.4		-	-	0.7	0.9	3.6	-
No.3	3L	8.0	0.6	1.4	1.6	1000	-	-	0.9	0.8	5.0	-
	3R		1.4	1.1	1.1		-	有	0.9	0.8	5.2	4.3
No.4	4L	5.3	2.6	1.6	0.6	530	-	-	0.9	0.8	4.0	-
	4R		0.8	1.2	0.9		-	-	1.0	0.9	4.3	-
No.5	5L	26.0	0.8	0.7	1.4	1000	-	-	1.3	1.0	4.0	-
	5R		2.0	4.0	3.9		有	-	8.7	0.8	-	-
No.6	6L	13.6	1.7	2.2	4.0	1000	-	-	1.7	0.3	3.5	-
	6R		0.4	0.1	0.0		-	-	0.6	1.0	0.8	-
No.7	7L	41.2	2.7	3.0	4.0	1000	-	-	2.3	1.3	-	-
	7R		2.1	1.6	3.4		-	-	1.5	0.9	4.5	-

※左,中,右のうちUIT施工前のき裂深さが最大の箇所を着色

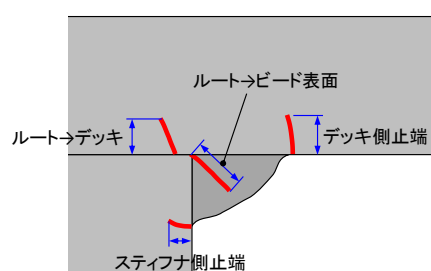


図 3-14 断面観察のき裂長さの定義

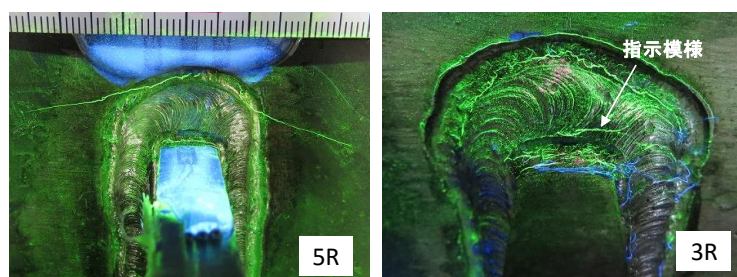


図 3-15 デッキ下面から観察されたき裂

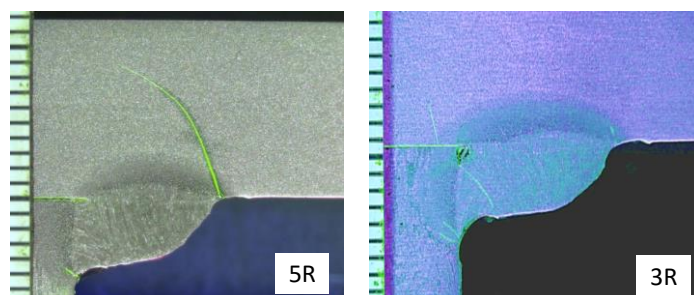


図 3-16 き裂導入後 UIT 施工試験体の断面観察

き裂を示している。デッキ側止端き裂がデッキ母材に進展したのは 5R のみであり、試験対象 12 箇所中 11 箇所ではデッキ母材へのき裂の進展はみられなかった。3R では荷重繰返し数 750 万回時点で溶接ビード表面にき裂が観察され、ルートを起点に発生したき裂が溶接ビードを貫通していると推測された。なお、荷重繰返し数 750 万回でき裂を発見して以降は、デッキ下面からの観察において当該き裂に進展は見られなかった。断面観察ではデッキ側止端のき裂に進展が見られなかった 11 箇所中 10 箇所ルートき裂が生じていた。図 3-16 に、5R と 3R の断面観察の結果を示す。デッキ側止端き裂が進展した 5R のき裂は、板厚方向に曲がりながら進展しており、ルートき裂は発生していない。これは、第 3 章の溶接のままの試験体におけるき裂の進展性状と同じである。3R では、デッキ側止端およびスティフナ側止端のき裂は停留しているが、

ルートき裂が進展し、溶接ビードを貫通するとともに、デッキへ進展している。その他 9 個所に生じたルートき裂については溶接ビードの貫通やデッキへの進展は生じていなかった。

表 3-2 に示したように、き裂が進展した 5R の UIT による凹み深さは 0.10mm と比較的浅い。しかし、推定き裂深さが 5R と同じ 4mm の 6L,7L では、凹み深さがそれぞれ 0.17mm, 0.24mm と 5R よりも深く、き裂が停留している。したがって、き裂を停留させるにはある程度の凹み深さが必要と考えられる。

なお、表 3-3 に示すとおり、スティフナ側止端のき裂はすべての個所で深さ 0.3～1.3mm で停留していた。しかし、第 2 章より、本試験条件では、UIT を施工しなくてもスティフナ側止端のき裂は停留することが確認されているため、スティフナ側止端のき裂に対する UIT の効果については、スティフナ側止端のき裂が進展する条件のもとで検討する必要がある。

UIT 施工前に導入したデッキ側止端き裂の推定深さの最大値が同じ 4mm であった 7L と 5R のデッキ側止端き裂の疲労破面を図 3-17 に示す。7L は UIT 施工前のき裂推定深さの最大値が右ゲージで 4mm であった。試験終了後の疲労破面においても右ゲージ近傍で最大深さ 4mm 程度であることから、UIT 施工後の疲労試験でき裂は進展しなかったと考えられる。一方、5R のき裂はデッキ側止端からデッキ板厚方向に 8-9mm 程度まで進展している。しかし、デッキ上面からのき裂の発生はなく、デッキ貫通には至っていない。



図 3-17 デッキ側止端き裂の疲労破面

図 3-18 に UIT 施工後の疲労試験中のひずみ範囲の変化を示す。き裂が停留した 7L のひずみ範囲は一定であるが、き裂が進展した 5R では、その減少の様子から疲労試験再開後すぐにき裂が進展したと考えられる。図 3-19 には、文献[5]に示されている溶接のままの試験体 (AW) と 5R のデッキ下面で観察したき裂の進展曲線を示す。5R のき裂進展は AW よりも遅く、停留するき裂長さも短い。また、AW では 140～750 万回の繰返し荷重によりすべての試験体においてデッキ上面にき裂が発生していたが、5R ではデッキ上面のき裂は観察されなかった。これらの結果から、5R ではデッキ側止端のき裂が進展したものの、その進展は UIT により遅延していたと言える。UIT による圧縮残留応力の導入が影響していると考えられるが、詳細についてはさらに検討が必要である。

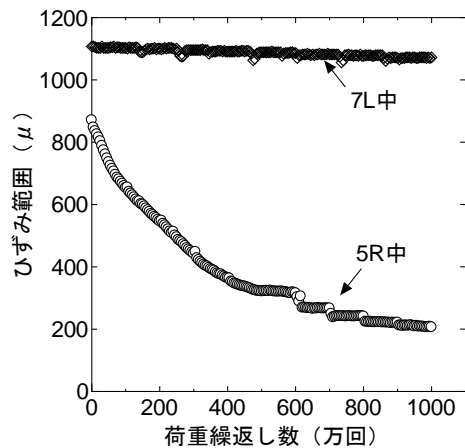


図 3-18 疲労試験中のひずみ範囲の変化

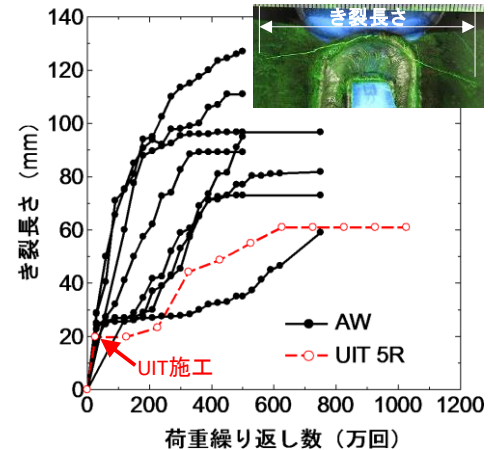


図 3-19 5R と AW のき裂進展の比較

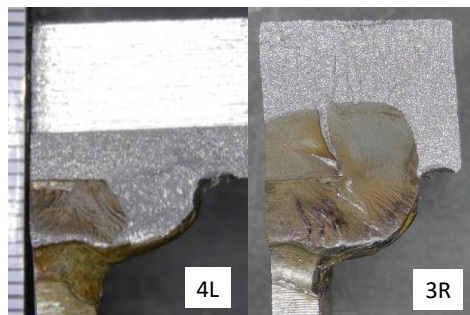


図 3-20 ルートき裂の疲労破面

ルートき裂の疲労破面を図 3-20 に示す．3R では溶接ビードの貫通とデッキへの進展が生じているが，その他の個所では 4L のように，ルートから扇状に疲労破面が生じていた．デッキまで進展していたのは 1 個所のみであることから，発生したルートき裂の進展は AW のデッキ側止端き裂に比べて大幅に遅いといえる．

3.4 UIT によるデッキ側止端き裂の閉口状態

3.4.1 き裂表面の閉口状態の観察

通常，溶接止端に生じるき裂は，溶接による引張残留応力の影響で開口しているが，UIT によりき裂が閉口されれば，き裂の深さ方向先端部の応力集中は緩和されることが考えられる．ここでは，UIT 施工前の推定き裂深さが同じ 4mm であったにも関わらず，き裂が進展した 5R と停留した 7L の UIT によるき裂の閉口状態を観察した．

図 3-21 に，5R と 7L のデッキ側止端部と UIT を実施していない AW の拡大断面写真を示す．なお，表 3-2 に示したデッキ側止端部の凹み深さは 5R で 0.10mm，7L で 0.24mm であった．図 3-21 より，5R，7L とともに UIT のピン先形状が転写される形で止端部が凹んでいる．また，表面付近が叩き潰されることでき裂が折り重なっており，7L ではより深くまで折り重なっているように見える．なお，き裂の幅も異なるように見えるが，5R は既にき裂が進展した後の状態であるため，両者の比較はできない．

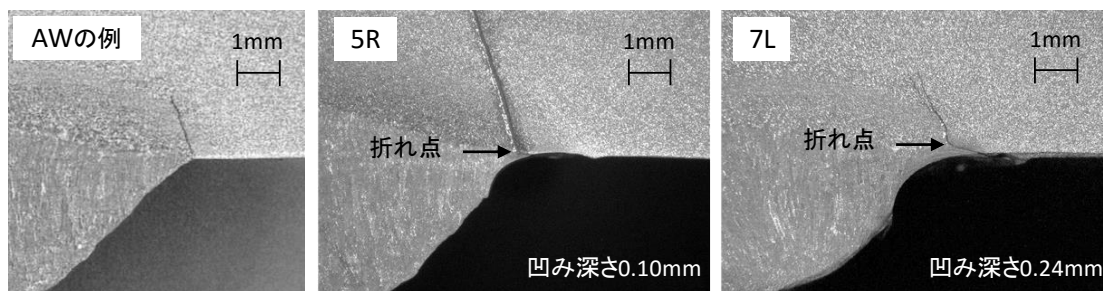


図 3-21 UIT によるき裂の閉口

3.4.2 荷重－ひずみ曲線によるき裂の開閉口挙動の検討

荷重と溶接止端から 5mm の位置におけるひずみ（中）の関係から，UIT 施工後のき裂の開閉口挙動について検討した．

図 3-22 に 5R の予き裂導入時のき裂深さに伴う荷重－ひずみ曲線の変化を示す．なお，いずれのき裂深さにおいても，載荷過程と除荷過程で荷重－ひずみ曲線はほぼ等しかったため，ここでは載荷過程の測定結果を代表として示している．き裂が生じる前の荷重とひずみは線形関係にあるが，き裂が生じると低い荷重領域と高い荷重領域で傾きの変化が生じており，傾きの変化はき裂が深くなるほど大きくなっている．また，低い荷重領域の傾きはき裂が深いほど急になっているが，高い荷重領域の傾きはき裂深さによらずほぼ一定である．これは，図 3-23 に示すように，荷重が小さいときには溶接による引張残留応力の影響でき裂が開いているが，荷重がある程度まで増加するとき裂が閉じてき裂面が力を伝達するためと考えられる．この傾きが変化する点をき裂の開閉口点とすると，図 3-22 ではき裂深さが深くなるに従い，開閉口荷重は増加する傾向にある．

UIT によりき裂が停留した 7L と進展した 5R のき裂導入前，き裂導入後，UIT 施工後，試験終了時の荷重－ひずみ曲線を図 3-24 に示す．7L では，き裂の導入により生じたひずみ範囲の減少と開閉口点が，UIT を施工することでき裂導入前と同程度まで回復している．UIT によりき裂が閉口し，き裂面がき裂導入前とほぼ同様に荷重を伝

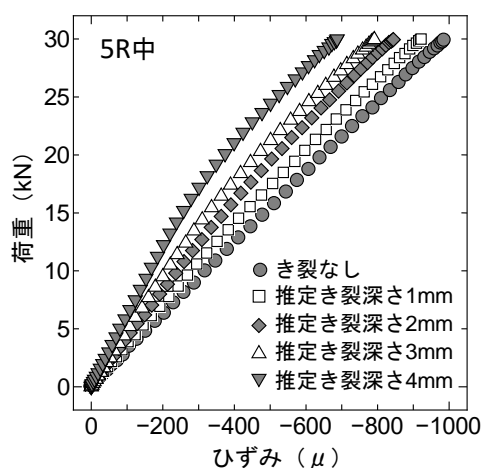


図 3-22 き裂導入時の荷重－ひずみ関係

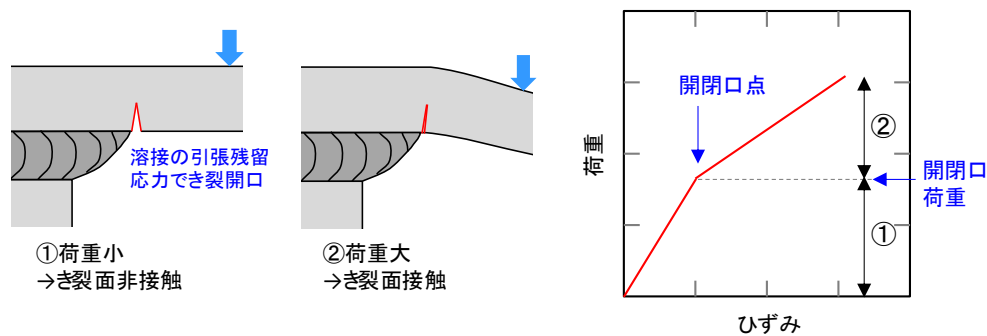


図 3-23 き裂の開閉口挙動と荷重－ひずみ曲線の関係

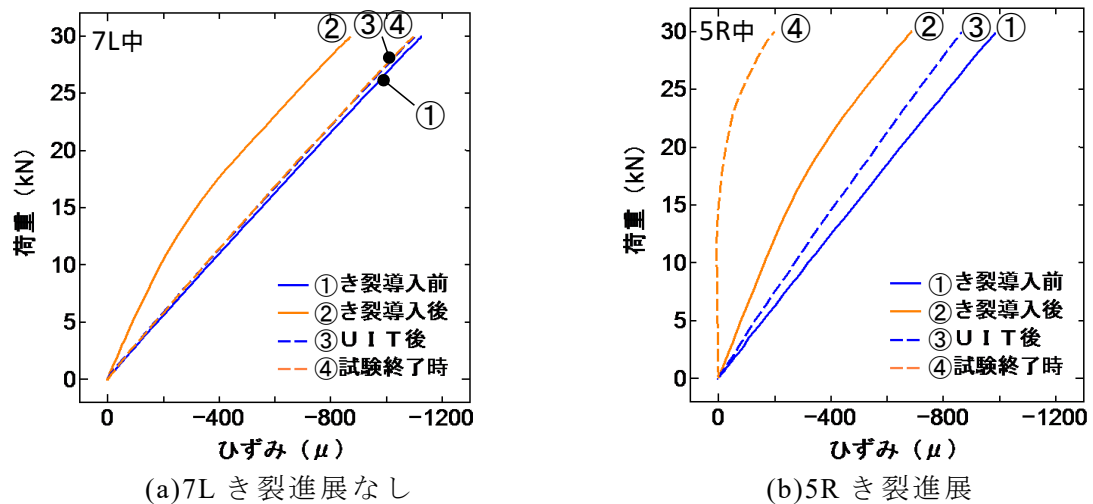


図 3-24 推定き裂深さ 4mm の試験対象における荷重－ひずみ関係の変化

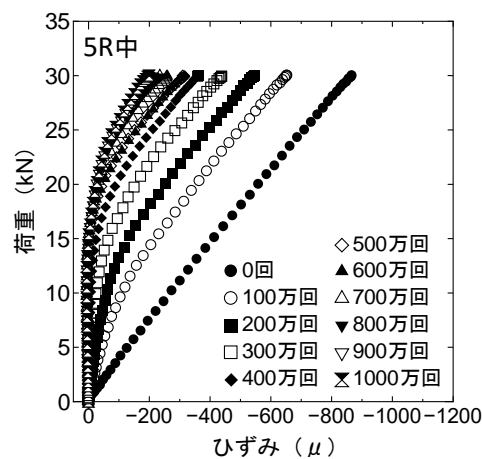


図 3-25 5R 中の UIT 後の荷重－ひずみ関係

達していると考えられる. また, それらの関係は疲労試験終了時まで保持されており, 試験終了時までき裂は閉口したまま変化しなかったと考えられる. き裂が進展した 5R では, UIT の施工により開閉口点はなくなっているものの, ひずみ範囲の回復は比較的小さい. 図 3-25 に, 5R の UIT 施工後の荷重－ひずみ曲線の変化を示す. 荷重繰返し数 100 万回時点ですでに, 明確な傾きの変化が生じており, 疲労試験開始後すぐにき裂が開口したのと考えられる.

3.4.3 UIT の打撃深さによる開閉口状態の変化の検討

UIT 施工後にき裂が進展した 5R では、UIT の凹みが浅く、荷重－ひずみ曲線において開閉口点はなくなっているものの、ひずみ範囲の回復が小さいことが確認された。ここでは、UIT の打撃深さをパラメータとした弾塑性 FEM 解析を行うことで、き裂が進展した原因について検討する。なお、解析に使用したソフトウェアは MidasNFX である。

解析モデルを図 3-26 に示す。解析モデルは試験体の 1/4 モデルとした。デッキとスチーフナの溶接脚長はデッキ側で 9mm、スチーフナ側で 6mm としている。UIT のピンは、施工範囲において打撃深さが一様となるよう一つの剛体ピンとしてモデル化した。ピンの直径と先端部の局率半径は 3mm である。き裂の長さは 20mm とし、き裂面の形状は長方形としている。なお、鋼材の弾性係数は $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比は 0.3、降伏強度は 300N/mm^2 、塑性後の応力－ひずみ曲線の傾きは 1000N/mm^2 とした。

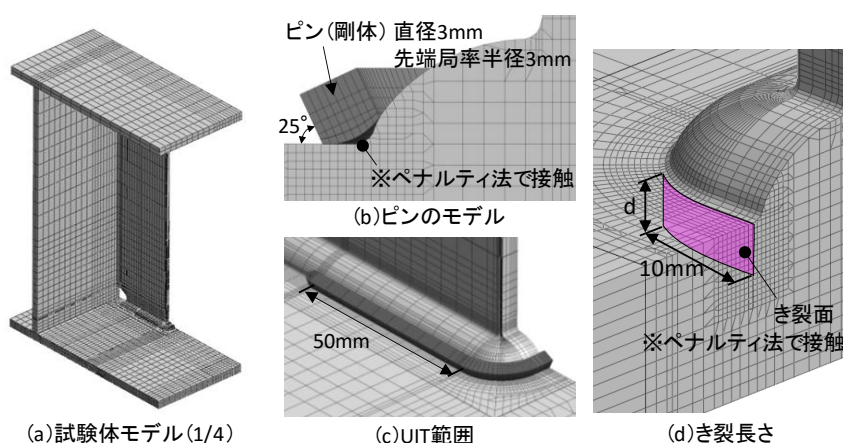


図 3-26 UIT を模擬した残留応力解析のモデル

解析は材料非線形に加えて、幾何非線形と接触も考慮した静的解析で行った。荷重は次の 3STEP に分けて载荷している。STEP1 で鉛直方向から 25°傾けた方向に試験体に向かってピンを押し込み、STEP2 で同方向に試験体と離れるまでピンを引き戻し、STEP3 で疲労試験と同条件の 30kN の荷重を载荷した。ピンと試験体の接触面およびき裂面にはペナルティ法による接触条件を与えて、接触面間の要素が干渉する場合に鋼材と同じ弾性係数を有する仮想バネが押し戻し、対になる面に 0.0001mm 以上貫入しないものとした。なお、STEP1,2 では、下向き姿勢で UIT を施工したことを考慮して、デッキ上面全範囲の鉛直方向を拘束し、STEP3 では、疲労試験と同様にウェブ直下の下フランジの下面において鉛直方向を拘束した。

UIT の解析を実施する前に、き裂深さ 2mm と 4mm において STEP3 の荷重のみを与えて、き裂の幅を検討した。き裂の幅は深さ方向に均一とし、き裂深さ 2mm では幅 0.0050mm, 0.0075mm, 0.0100mm, 0.0150mm の 4 ケース、き裂深さ 4mm では幅 0.005mm, 0.010mm, 0.015mm, 0.020mm の 4 ケースを検討した。解析より得られた荷重－ひず

み関係を図 3-27 に示す．なお，ひずみは図 3-2 の中と同位置で抽出している．どちらのき裂深さにおいてもき裂の幅が大きくなることで開閉口荷重が大きくなっている．き裂が開口している荷重領域の小さい範囲の傾きは，き裂深さ 4mm のほうが大きく，図 3-22 に示した実験結果と同様の傾向である．図 3-22 と図 3-27 の荷重－ひずみ関係を比較すると，開閉口荷重はき裂深さ 2mm では幅 0.0075mm，き裂深さ 4mm では幅 0.015mm の解析結果が実験結果と比較的近いように見える．き裂が深くなることでき裂の幅は大きくなると考えられる．

き裂がないモデルに打撃深さ 0.3mm の UIT を模擬した荷重を与えた．STEP1（ピン載荷）・STEP2（ピン除荷）終了時の回し溶接中央断面の最小主応力の大きさとその方向を図 3-28 に示す．ピンが押し込まれているときには高い圧縮応力が深くまで分布しているが，ピンを引き戻した後は深さ方向の分布範囲が小さくなっている．また，ピンが押し込まれている状態では接触面と直交する方向の応力が卓越しているが，ピンを引き戻した後は接触面と平行方向に卓越している．図 3-29 にピン荷重を除荷した後の橋軸方向，橋軸直角方向，鉛直方向の残留応力コンターを示す．UIT を模擬した荷

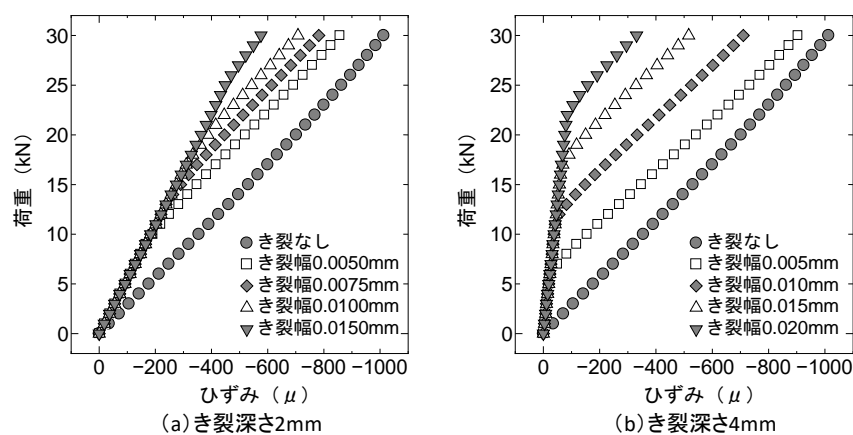


図 3-27 き裂の幅による荷重－ひずみ関係の変化

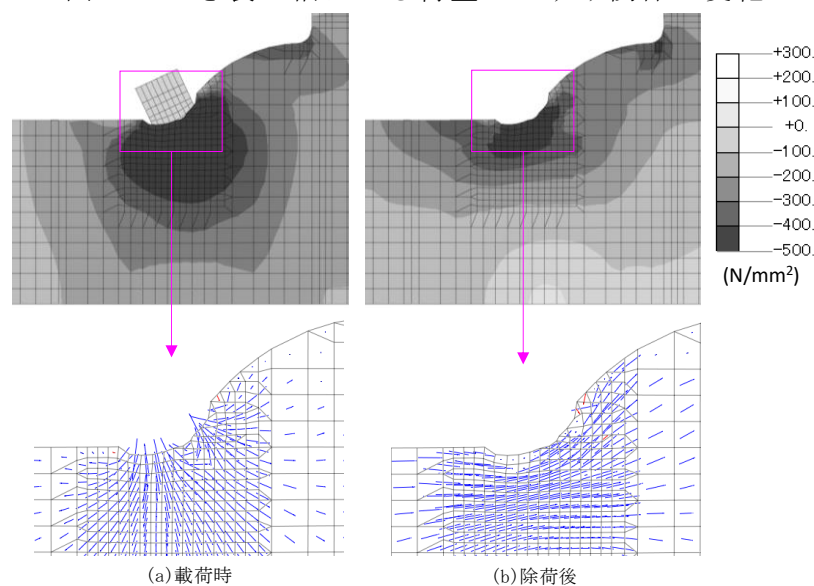


図 3-28 ピンの載荷時と除荷後の最小主応力の大きさと方向

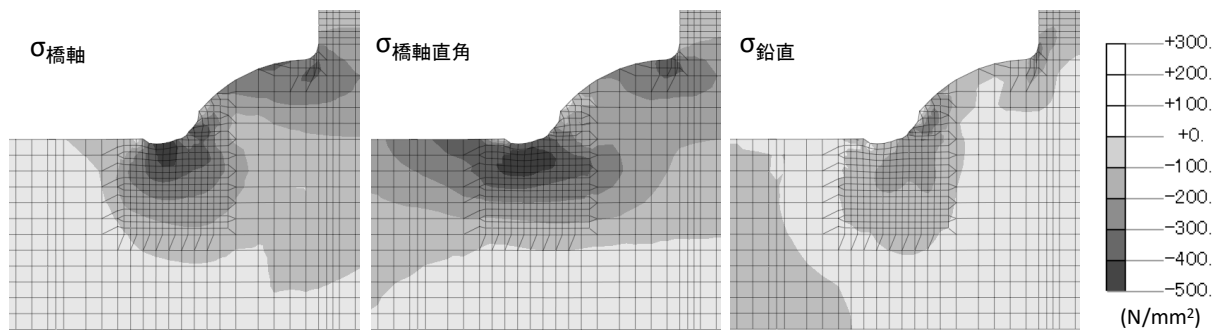


図 3-29 ピン除荷後の各方向の残留応力コンター（き裂なし）

重を与えた溶接止端ではすべての方向に圧縮残留応力が生じている。

打撃深さが圧縮残留応力の分布に及ぼす影響を調べるため、ピンの最深部が 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm となる 3 ケースの荷重を与えて解析を行った。き裂がないモデルの STEP2 終了時の橋軸直角方向の残留応力コンターを図 3-30 に示す。打撃深さが深いほど、広く深い範囲まで圧縮残留応力が導入されている。なお、0.1mm, 0.2mm, 0.3mm の各打撃深さにおいて UIT 施工後に残留した凹み深さは、それぞれ 0.09mm, 0.18mm, 0.28mm であった。次に、き裂深さ 4mm でき裂幅 0.015mm のモデルにおいて打撃深さ 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm の荷重を与えた際の STEP2 終了時の橋軸直角方向残留応力コンターを図 3-31 に示す。き裂がないモデルに比べて応力は小さいものの、き裂面が接触して広い範囲に圧縮残留応力が分布している。

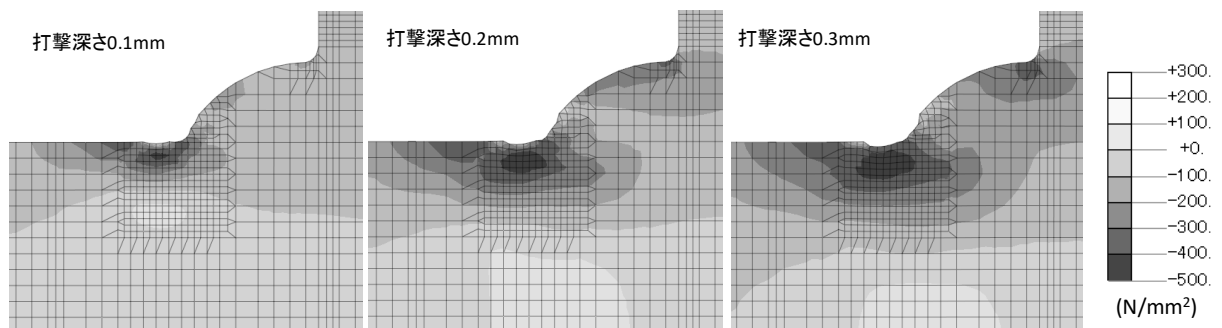


図 3-30 き裂がないモデルの橋軸直角方向の残留応力コンター

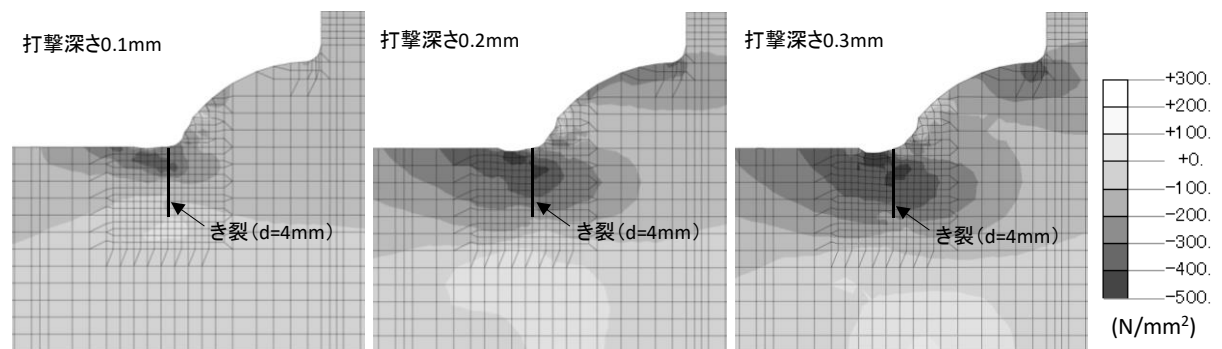


図 3-31 き裂深さ 4mm モデルの橋軸直角方向の残留応力コンター

さらに，STEP3 で 30kN の荷重を与えた際の荷重－ひずみ関係を図 3-32 に示す．打撃深さ 0.2mm，0.3mm では，き裂がない状態とほぼ同程度までひずみ範囲が回復しているが，打撃深さ 0.1mm では，き裂の開閉口点は生じていないものの，き裂がない状態よりもひずみ範囲が小さくなっている．図 3-31 において，打撃深さ 0.1mm では圧縮残留応力がき裂の表面付近のみにしか導入されておらず，荷重－ひずみ関係の相違はき裂面の接触深さの違いに起因するものと考えられる．なお，打撃深さ 0.1mm で荷重が増すごとに表面のひずみ増分が小さくなっているのは，き裂の幅を一様としてモデル化したことで，UIT 施工後はき裂の表面部分のみが強く接触していたが，その後，圧縮荷重が載荷されて，より深い範囲までき裂面が接触し，き裂面の力の伝達が分散したためと考えられる．また，打撃深さ 0.2mm，0.3mm でき裂なしよりも若干大きなひずみが生じているのは，き裂面の接触が表面付近に集中したことや，大きな圧縮残留応力が導入されたことに起因している可能性があるが，詳細は明らかでない．これらの解析結果と図 3-24 に示す実験から得られた荷重－ひずみ関係を比較すると，打撃深さ 0.2mm，0.3mm の解析結果は打撃深さが 0.24mm でき裂が進展しなかった 7L，打撃深さ 0.1mm の解析結果は打撃深さが 0.1mm でき裂が進展した 5R の変化と類似している．このように，ある程度の打撃深さを確保することで圧縮残留応力が広い範囲に導入でき，UIT 施工後のき裂の開口や進展を防ぐことに繋がると考えられる．

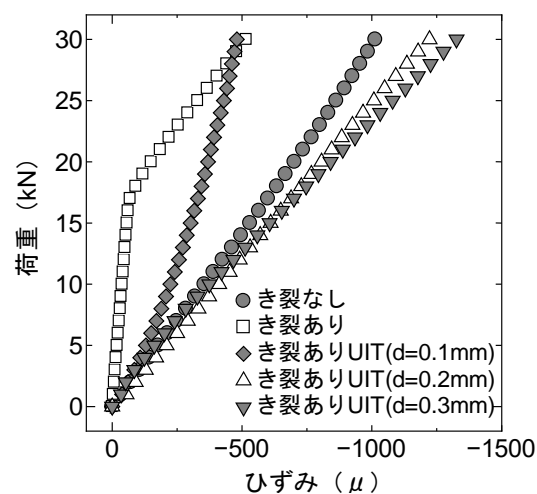


図 3-32 打撃深さによる荷重－ひずみ関係の変化

3.5 UIT によるき裂進展の抑制効果の検討

垂直スティフナ上端溶接部では，デッキ側止端のき裂が進展すると，断面欠損により引張応力が増加したデッキ上面から新たにき裂が発生し，デッキ下面側のき裂と合体してデッキの貫通に至ることが知られている．しかし，5R ではデッキ下面側のき裂は進展したものの，上面からのき裂は発生しておらず，デッキは貫通に至らなかった．UIT の施工によりき裂表面が閉口したことでき裂の進展が遅延し，デッキの貫通に至

らなかった可能性が考えられたため、弾性 F E M 解析を用いて、き裂表面が開口している場合と閉口している場合のき裂先端の応力拡大係数（K 値）およびデッキ上面応力の変化を調べた。

解析モデルを図 3-33 に示す。第 3 章と同様に、着目部であるまわし溶接近傍をソリッド要素、その他をシェル要素でモデル化した。き裂のサイズは深さ×長さをそれぞれ 4mm×24mm、6mm×28.6mm、9mm×40mm とし、実際のき裂がデッキ板厚方向に曲がりながら進展していることから、解析モデルにおいてもき裂面を曲面とした。き裂面は 2 重節点で模擬し、UIT によるき裂面の閉口範囲が不明なことから、ここでは仮に表面部のみが閉口していた場合の傾向を調べるため、き裂表面から深さ 0.2mm までは閉口していることとした。なお、簡単のためき裂面の閉口は対になるき裂面を一体とすることで模擬し、き裂面の接触は考慮せず、UIT により導入される残留応力も考慮していない。き裂先端付近の要素寸法は 0.25mm とし、き裂先端から 0.25mm、0.50mm 離れた 2 点の K 値をそれぞれ変位法で求め、それらをき裂先端に外挿することでき裂先端の K 値を求めている。荷重は疲労試験と同じように、デッキ上面の中央部に 30kN を載荷した。

解析より得られた K 値の変化を図 3-34 に示す。き裂表面の閉口有無に関わらず、き裂が浅い場合に K 値は高い傾向にあるが、閉口した場合の K 値は開口している場合に比べて大幅に低くなっている。図 3-35 にはデッキ上面応力の変化を示す。き裂表面が開口している場合には、き裂が深くなることで応力が増加しているが、閉口するとき裂の深さによらずほぼ一定で低い応力となる。これらの結果から、UIT によりき裂の表面がある程度閉口すれば、UIT をしない場合に比べてき裂の進展速度は遅くなり、デッキ上面からのき裂も生じにくくなると考えられる。

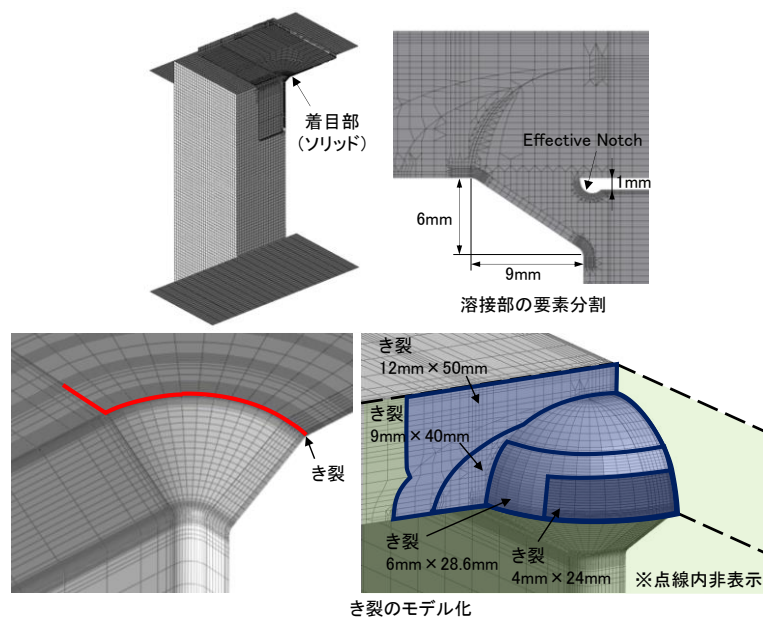


図 3-33 き裂表面が閉口した効果を検討する解析モデル

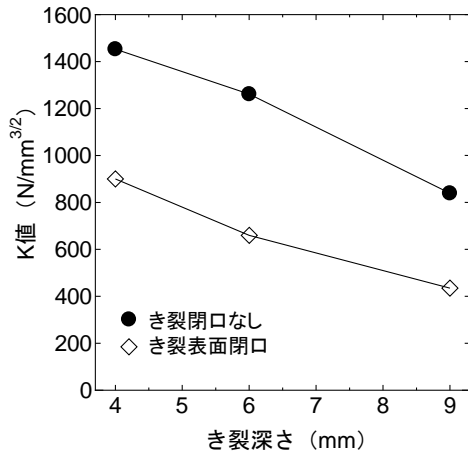


図 3-34 閉口による K 値の変化

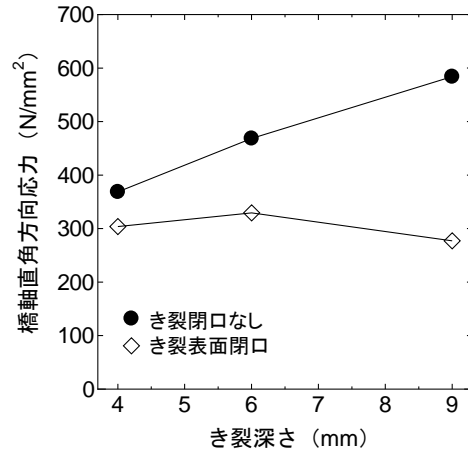


図 3-35 閉口によるデッキ上面応力の変化

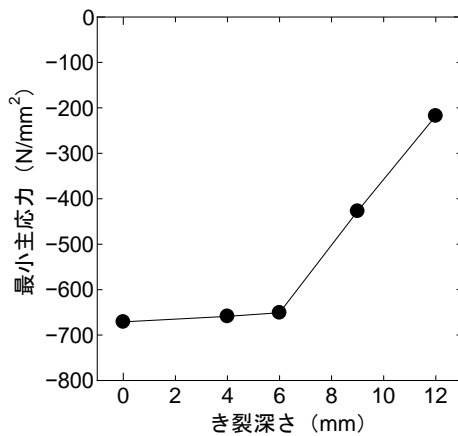


図 3-36 き裂深さとルート応力の関係

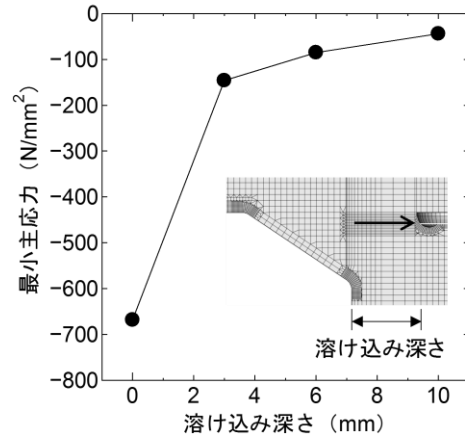


図 3-37 溶け込みとルート応力の関係

3.6 ルートき裂が発生・進展した原因の検討

UIT の施工によりデッキ側止端のき裂が停留した 11 個所中 10 個所の試験対象において、ルートき裂が発生・進展した原因を調べる目的で、デッキ側止端き裂の大きさとルート部応力の関係を弾性 FEM 解析により求めた。解析モデルは図 3-24 と同じである。着目部であるルート部には半径 1mm の Effective Notch[6]を設けており、その要素寸法は 0.1mm とした。き裂のサイズは深さ×長さをそれぞれ 4mm×24mm, 6mm×28.6mm, 9mm×40mm, 12mm×50mm (デッキ貫通)とし、曲面でき裂をモデル化した。図 3-22 に示す、き裂導入時の荷重－ひずみ関係から、少なくともき裂面の一部は接触していると考えられるが、溶接による引張残留応力が影響する曲面のき裂において、その接触を再現することは難しい。本解析ではき裂が生じた場合のルート部応力の変化の傾向を調べるため、き裂面の接触は考慮せずに解析を行った。

疲労試験と同じ条件で 30kN の荷重を載荷した際の解析結果を図 3-36 に示す。き裂深さ 6mm まではルート部の最小主応力の変化は小さいが、深さ 9mm 以上では、応力

が大幅に低下している。き裂面が接触する荷重領域においては、このような大幅な応力低下は生じないと考えられるが、図 3-25 に示すように、き裂が深くなることで開閉口荷重が高くなり、本解析条件のようなき裂面が接触しない状態に近くなると考えられる。UIT を施した試験体でルートき裂が発生・進展したのは、UIT の施工により止端き裂が停留したことで、ルート部先端の応力集中が高いままになったためと考えられる。

ルート部先端の応力集中は、溶接の溶け込みが深い場合に小さくなると考えられるため、仮に溶け込みを深くした場合のルート部応力の変化を調べた。図 3-37 に、ルート部の最小主応力と溶け込み深さの関係を示す。溶け込みを深くすると、ルート部の最小主応力は大幅に低減されており、例えば溶け込みを 3mm にすると、溶け込み 0 の 22%まで低減されている。

3.7 UIT で導入された圧縮残留応力の測定

(1) 残留応力の測定方法

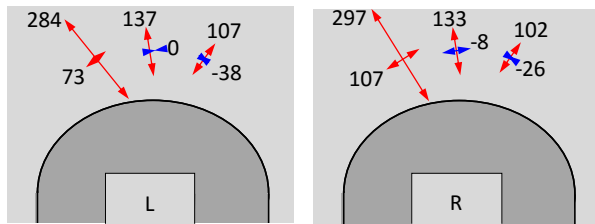
UIT の施工により導入される圧縮残留応力を推定するため、切断法による残留応力測定と UIT 施工前後でのひずみ変化を整理した。切断法に用いた試験体は、No.8 の AW 試験体、No.9 のき裂がない状態で UIT を施工した試験体、No.10 のき裂導入後に UIT を施工した試験体の計 3 体である。残留応力は図 3-2 の左、中、右と同じ位置にゲージ長 1mm の 3 軸ひずみゲージを貼付し、ゲージの周囲を切断することで測定した。UIT 施工前後のひずみ変化は、疲労試験に用いた試験体のうちの No.5,6,7 の 3 体で測定した。ひずみゲージの貼付位置は図 3-2 に示したとおりで、UIT 施工前にひずみの測定を開始し、施工後のひずみから施工前のひずみを引くことでひずみ変化を求めた。

(2) 残留応力の測定結果

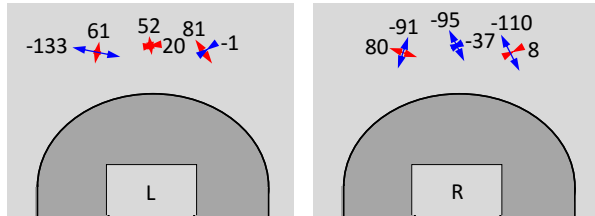
No.8,9,10 試験体の切断によるひずみの変化から求めた残留応力(最大・最小主応力)を図 3-38 に示す。AW 試験体では溶接線に直交する方向に引張応力が卓越しており、それらの値は L と R でほぼ同じである。これらに対して、UIT を施工した 2 つの試験体では、ばらつきはあるものの引張残留応力の緩和や圧縮残留応力への変化が生じている。なお、き裂の深さと導入された残留応力に相関は認められなかった。これは、打撃の深さ、き裂の発生状況、UIT 後のき裂面の接触状況等がそれぞれ異なるためと考えられる。

(3) UIT 施工前後のひずみ変化の測定結果

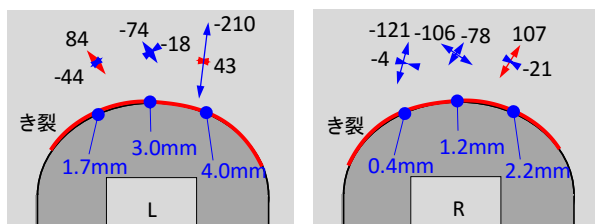
疲労試験に用いた No.5,6,7 試験体の UIT 施工前に導入したき裂の推定深さと、UIT 施工前後のひずみの変化を表 3-4 に示す。すべてのひずみゲージで圧縮のひずみが生じており、UIT によりき裂面に圧縮残留応力が導入されていると考えられる。しかし、き裂が進展した 5R のひずみは他の試験体に比べて小さく、この結果からも 5R では UIT により導入された圧縮残留応力が小さかったと推定される。なお、切断法による残留応力測定と同様に、き裂の深さと導入された残留応力に相関は認められなかった。



(a) AW試験体 (No. 8)



(b) き裂がない状態でUITを施工した試験体 (No. 9)



(c) き裂導入後にUITを施工した試験体 (No. 10)

表 3-4 UIT 施工前後の残留ひずみ測定結果

試験体	試験部位	推定き裂深さ(mm)			ひずみ(μ)		
		左	中	右	左	中	右
No.5	5L	0.8	0.7	1.4	-1407	-572	-1293
	5R	2.0	4.0	3.9	-751	-392	-599
No.6	6L	1.7	2.2	4.0	-1687	-1542	-1330
	6R	0.4	0.1	0.0	-926	-939	-2013
No.7	7L	2.7	3.0	4.0	-1413	-869	-2448
	7R	2.1	1.6	3.4	-2199	-1041	-

※7R右はUITによりゲージ破損

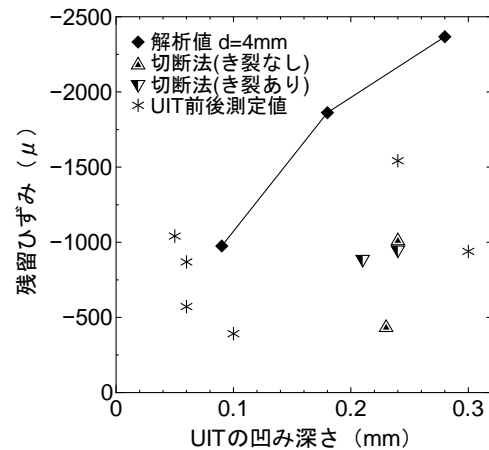


図 3-38 切断法による残留応力測定結果

図 3-39 解析と実験の残留ひずみの比較

(4) 残留応力測定結果と弾塑性 FEM 解析の比較

切断法による残留応力測定および UIT 施工前後のひずみ測定の結果と弾塑性 FEM 解析により得られた圧縮残留ひずみを比較した。比較対象はまわし溶接中央部のデッキ側溶接止端から 5mm 位置の橋軸直角方向のひずみとした。切断法による測定は、(a)AW 試験体、(b)き裂がない状態で UIT を施工した試験体、(c)き裂導入後に UIT を施工した試験体の 3 種類のため、(b)あるいは(c)と(a)の差を算出することで切断法による実験値とした。なお、(a)において L と R の差は小さいため、これらを平均した値を(a)の実験値としている。

解析値と実験値の比較結果を図 3-39 に示す。実験値は、切断法（き裂なし）以外はすべてき裂導入後に UIT を施工した試験体の結果であり、導入されているき裂深さは 4mm 以下でそれぞれ異なる。しかし、いずれの実験値も、き裂深さ 4mm における解析値より小さく、本解析で得られた残留ひずみは実験よりも大きい傾向にあると考えられる。本章で示した UIT を模擬した解析は、あくまで定性的な特徴を調べるものであり、定量的な評価をするための解析手法については更なる検討が必要である。

3.8 まとめ

本章では、鋼床版垂直スティフナ上端のデッキ側溶接止端に留まる段階の疲労き裂を対象に、UIT を施工する補修効果について、小型試験体の疲労試験と応力解析を行うことにより検討した。ここで得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 溶接のままで UIT を施工することで、デッキ側止端き裂の発生を防止できた。ルートき裂が発生・進展したが、その進展は十分に遅く、UIT の施工により疲労耐久性は大幅に向上した。
- (2) 深さ 4mm 程度以下のデッキ側止端のき裂に対して UIT を施工することで、12 箇所中 11 箇所のき裂が停留した。そのうち 10 箇所でルートき裂が発生・進展したが、その進展は遅く、UIT の高い補修効果が確認された。UIT による高い補修効果を確実とするためには、UIT による凹み深さの管理が重要であることを示した。
- (3) デッキ側止端のき裂が進展したのは、き裂深さが 4mm と深く、UIT 施工後の打撃深さが比較的浅い 1 箇所のみであった。その進展速度は溶接のままに比べて遅かった。
- (4) デッキ側止端のき裂が深くなることでルート部先端の応力が減少する。UIT を施工した試験体では、止端き裂が停留したことでルート部先端の応力が高いままとなり、き裂が発生・進展したと考えられる。

本検討は、小型試験体に 30kN の繰返し荷重を載荷する比較的厳しい条件で行ったが、どの程度の荷重まで UIT の補修効果が持続するかについては検討していない。ピーニングでき裂を閉口させた後に、閉口部を塑性化させるような大きな荷重が生じた場合には、き裂が再度開口して、補修効果が消失することもある。実橋でどの程度の荷重を想定すべきかも含めて、過荷重の影響については別途検討が必要と考えている。

【参考文献】

- [1] 山田健太郎，石川敏之，柿市拓巳：疲労き裂を閉口させて寿命を向上させる試み，土木学会論文集 A，Vol.65，No.4，pp.961-965，2009.
- [2] 舘石和雄，判治剛，石川敏之，清水優：引張または曲げ荷重を受ける溶接継手に対する ICR 処理の効果，構造工学論文集，Vol.61A，pp.627-637，2015.
- [3] 松本理佐，石川敏之，塚本成昭，栗津祐太，河野広隆：鋼床版垂直補剛材溶接部のき裂を対象とした各種補修法の効果の比較に関する研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.72，No.1，pp.192-205，2016.
- [4] 国土交通省：新技術活用システム NETIS（New Technology Information System）．超音波ピーニング処理（UIT）工法．KTZ-070004-V，2014.
- [5] 森猛，原田英明，大住圭太，平山繁幸：鋼床版垂直スチフナ溶接部に生じる疲労き裂の補修・補強方法，鋼構造論文集，Vol.18，No.69，pp.51-59，2011.
- [6] Hobbacher, A. : IIW Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, WRC Bulletin 520, The Welding Research Council, New York, 2009.

第 4 章 デッキプレート母材に進展したき裂に対するストップホールの効果

4.1 はじめに

図 4-1 に示すように、垂直スティフナ上端溶接部に生じる疲労き裂が溶接部を離れてデッキ母材まで進展している場合には、き裂の先端にストップホールが設置されることが多い。また、このき裂はある程度進展した後、停留する傾向があることから[1]、き裂先端にストップホールを施工することで措置を完了としていることも少なくない。しかし、ストップホール法による補修の効果が十分に明らかとなっているとは言えないのが現状である。

本章では、鋼床版垂直スティフナ溶接部のデッキ母材まで進展した疲労き裂に対するストップホール法の効果を明らかにすることを目的に、小型試験体の疲労試験と応力解析を行う。また、ストップホールで補修した場合の疲労耐久性評価を行うための疲労強度曲線について、既往の疲労試験データ[2,3,4]を基に検討する。

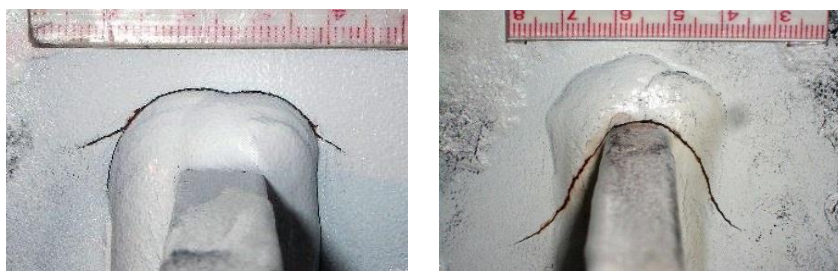


図 4-1 デッキ母材まで進展したき裂

4.2 疲労試験

4.2.1 試験体

試験体は図 2-6 に示す、第 2 章や第 3 章で用いたものと同じ、垂直スティフナ取り付け部を模擬した小型試験体である。

試験体数は 5 で、No.1～3 の 3 体はデッキと垂直スティフナのルートギャップが 0mm、No.4 と No.5 の 2 体はルートギャップが 1mm となることを狙って製作した試験体である。試験体 1 体に対してデッキと垂直スティフナの接合部は 2 箇所あるため、それらを図 2-6 に示すように L・R と区別している。

疲労試験前に、すべての試験体のまわし溶接部の溶接脚長、止端曲率半径を計測した。計測は親水性ビニールシリコン印象材で溶接部を型取りし、垂直スティフナ板厚中心近傍から 2mm 程度の厚さに 4 枚を切り出し、拡大投影機で 10 倍に拡大して行った。各溶接部で計測した各測定値の平均を表 4-1 に示す。

4.2.2 疲労試験の方法

動的能力 100kN の電気油圧サーボ式材料試験機を用いて 5 体の試験体の疲労試験を行った。载荷位置は図 2-6 に示すデッキ上面の中央 50mm×100mm の領域とし、拘束は

表 4-1 試験体の溶接形状

試験体	脚長(mm)		止端半径(mm)	
	デッキ側	スティフナ側	デッキ側	スティフナ側
No.1L	8.9	6.6	1.4	1.2
No.1R	9.0	6.3	1.3	1.3
No.2L	8.3	5.8	1.6	1.4
No.2R	8.9	6.0	1.3	1.1
No.3L	8.9	6.3	1.3	1.3
No.3R	9.1	6.3	1.3	1.4
No.4L	10.8	7.9	2.8	3.3
No.4R	10.4	7.5	0.9	1.9
No.5L	9.6	7.5	1.2	1.2
No.5R	10.2	7.5	1.6	2.0

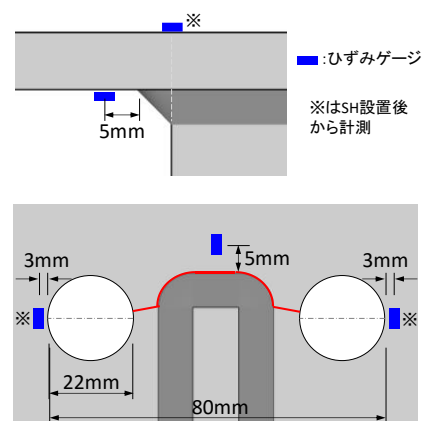


図 4-2 ひずみゲージ貼付位置

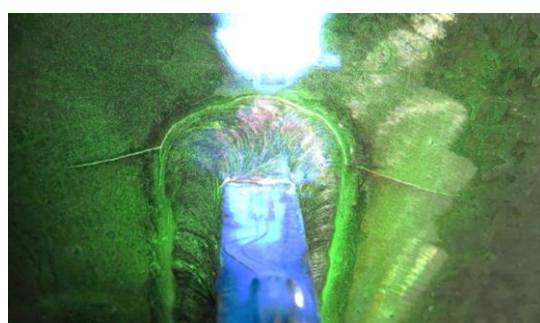


図 4-3 ストップホール補修前(1L)



図 4-4 補修後(1L)

ウェブ直下に鋼製丸棒を設置することにより行った．荷重範囲は 30kN（0.3kN－30.3kN），繰返し速度は 5Hz である．

疲労試験の手順は以下の通りである．まず，試験体に疲労き裂を導入するための疲労試験を行う．疲労試験中は，疲労き裂の発生・進展性状を調べる目的で，図 4-2 に示すようにデッキと垂直スティフナのまわし溶接の止端から 5mm 離れたデッキ下面にゲージレングス 2mm の 1 軸ひずみゲージを貼付し，荷重繰返しに伴うひずみ範囲の変化を動ひずみ計で測定した．ひずみ範囲に大きな減少がみられた後は磁粉探傷試験を行い，疲労き裂の進展状況を観察した．疲労き裂がデッキ母材にある程度進展したことを確認した時点で，疲労試験を中断し，疲労き裂の先端にストップホールを空けて同じ条件で疲労試験を再開した．

ストップホール補修前の疲労き裂の様子を図 4-3，ストップホール補修後の様子を図 4-4 に示す．き裂を挟む 2 つのストップホールの設置位置は，孔壁外側の間隔が 80mm となるように，また垂直スティフナを挟んで対称となるようにした．ストップホールの直径は，施工後にき裂先端および孔壁のきずの除去を確認するのに十分なサイズである 22mm とし，その施工はホールソーで行った．なお，都市内高速道路においても，直径 20mm 程度のストップホールが用いられている[5,6]．ストップホールには 2mm 程度の面取りを行っている．また，ストップホール施工時に生じる恐れのある

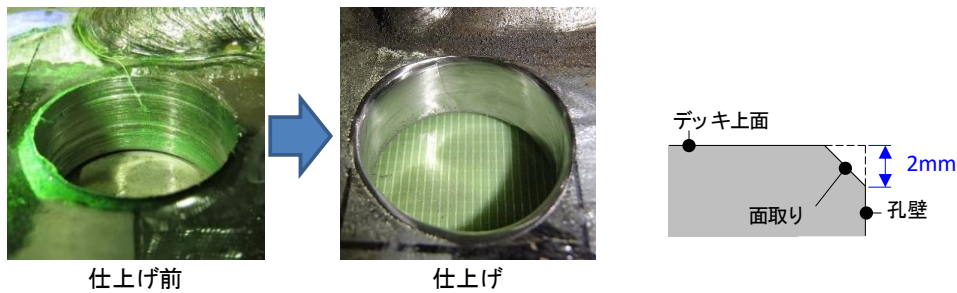


図 4-5 仕上げ前後の孔壁の状況

きずが孔壁に残存しないように、ストップホール壁を仕上げています。仕上げ前後のストップホール壁の様子を図 4-5 に示す。仕上げは、円筒形のビトリファイド砥石(#36)で研磨した後、ゴム砥石(#80 あるいは#120)で研磨することにより行った。ストップホールの面取りも円錐型および円筒型の#36, #80, #120 の砥石を用いて行った。なお、既設の鋼床版ではデッキの上に舗装が敷設されているため、ストップホールのデッキ上面側に対する面取り・仕上げは交通規制の時機にあわせて行うことになる。ストップホールから漏水することもあるため、交通規制の際には、防水対策を行うことも考えられる。

ストップホール設置後は、図 4-2 に示すように、垂直スティフナこば面直上のデッキ上面とストップホール外側の孔壁から 3mm 離れたデッキ上下面にひずみゲージを貼付し、荷重繰返しに伴うひずみ範囲の変化を計測することで、き裂の進展および再発生を調べた。なお、試験体 1 体にストップホールは 4 箇所あるため、これらのゲージ貼付位置を図 3-2 に示すように L・R, E・W で区別する。

4.2.3 疲労試験結果

(1) 疲労き裂を導入するための疲労試験の結果

表 4-2 に疲労試験結果を示す。疲労き裂を導入するための疲労試験（ストップホー

表 4-2 疲労試験結果

試験体		SH設置前		SH設置後		
		荷重繰返し数 (万回)	き裂長さ (mm)	デッキプレートき裂 貫通の回数 (万回)	SH孔壁のき裂再発有無	
					荷重繰返し数 (万回)	有無
No.1	L	70	58	0~80※	580	無
	R	70	48	0~80※	580	無
No.2	L	90	51	10	660	無
	R	90	59	10	660	無
No.3	L	50	42	10	620	無
	R	50	43	15	620	無
No.4	L	200	27	SH設置時切断	1207	無
	R	200	49	20	1207	無
No.5	L	360	48	貫通せず	945	無
	R	360	30	貫通せず	945	無

※データ欠損により特定できず

ル設置前)を行い、デッキと垂直スティフナにルートギャップのない No.1～3 試験体では 50～90 万回の繰返し荷重を与えることで長さ 42～59mm のき裂を、1mm のルートギャップを有する No.4,5 試験体では 200～360 万回の繰返し荷重を与えることで長さ 27～48mm のき裂を発生させた。なお、この時点でデッキ上面にき裂が生じている試験体はなかった。ルートギャップを有する試験体でき裂の発生・進展が遅い傾向がみられた。これは、表 4-1 に示す通り、No.1～3 試験体よりも No.4,5 試験体の方が脚長が若干大きかったこと、またルートギャップが影響している可能性もあるが、詳細は不明である。

すべての試験体において垂直スティフナ側止端からもき裂が発生したが、そのき裂は、第 3 章の AW 試験体等と同様に、疲労試験を開始してからすぐに橋軸直角方向に 2～3mm 程度進展し、その後は進展が停止した。

(2) ストップホールの設置

No.4L, No.5R を除く 8 箇所は、所定の位置にストップホールを設置することでき裂先端を除去することができたが、き裂長さ 27mm の No.4L とき裂長さ 30mm の No.5R は、所定のストップホール設置位置までき裂が進展していなかったため、図 4-6 に示すように、No.4L ではストップホール間のデッキをソーカットし、No.5R ではき裂先端がストップホールまで達しない状態のままとした。

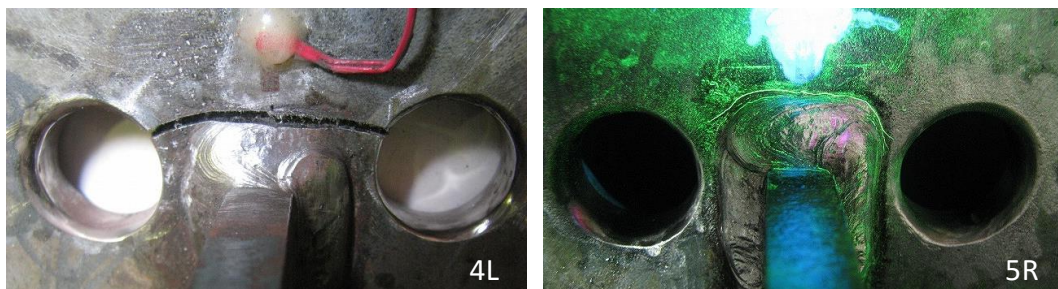


図 4-6 所定のストップホール位置まで進展しなかった試験対象

(3) ストップホール施工後の疲労試験の結果

表 4-2 に示すように、ストップホール施工後の疲労試験では 580～1207 万回の繰返し荷重を与えた。可能な限り長い荷重繰返し数とするため、各試験体で荷重繰返し数が異なっている。ストップホール設置時点でき裂先端がストップホールまで達していなかった No.5R の疲労き裂は、荷重繰返し数 200 万回程度でストップホール内へ進展した。試験後、ストップホール壁を磁粉探傷試験で詳細に観察したが、いずれの試験体においてもストップホール壁からの疲労き裂の発生は認められず、ストップホールの高い補修効果が確認された。孔壁の観察例を図 4-7 に示す。

No.1～No.4 試験体では、表 4-2 に示すようにストップホール施工後比較的早期にデッキ上面にき裂が発生した。デッキ上面に発生したき裂の例を写真 4-8 に示す。図 4-9

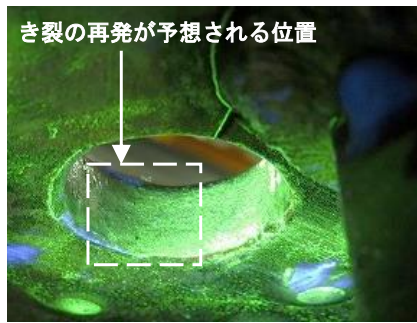


図 4-7 孔壁の観察例

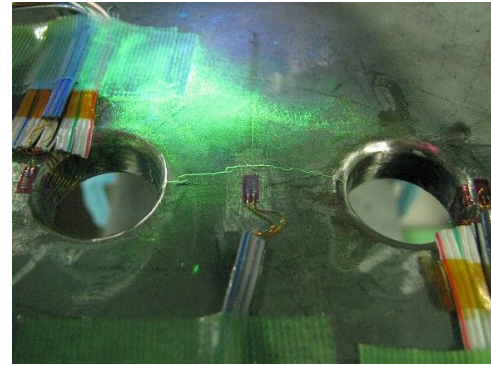


図 4-8 デッキ貫通き裂の例

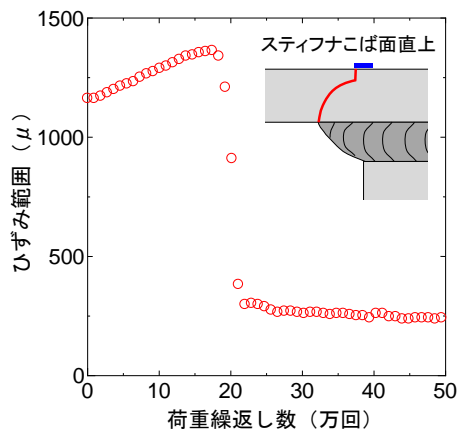


図 4-9 ひずみ範囲と荷重繰返し数

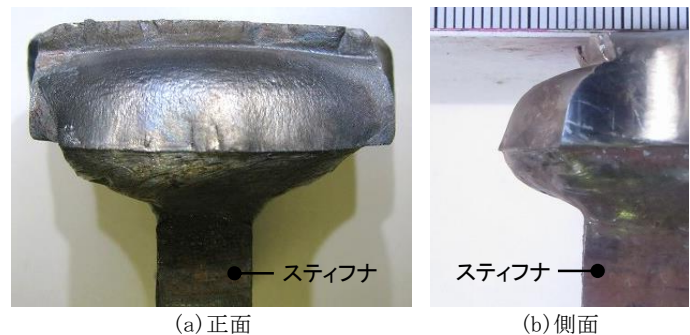


図 4-10 デッキ貫通き裂の疲労破面の例

にストップホール施工後のデッキ上面のひずみ範囲の変化の例 (No.4R) を示す. この部位では疲労試験再開後, ひずみ範囲は荷重繰返しとともに増加しているが, 荷重繰返し数 20 万回時に急激に減少した. これは, デッキ下面からのき裂が貫通した, もしくはデッキ上面からき裂が発生したためと考えられる. 図 4-10 に疲労破面の例を示す. なお, 暴露した疲労破面のすべてで錆が発生していたため, 錆除去剤を用いて除去している. 疲労破面は, デッキ下面から進展した破面とデッキ上面から進展した破面から成り, それらはデッキ下面から板厚方向に 3/4 程度の位置で合体している. そのため, その位置に大きな段差が生じている. このことから, デッキ下面から生じたき裂がデッキを貫通したのではなく, 新たにデッキ上面からき裂が生じ, 下面からのき裂と合体することで貫通に至ったと思われる.

No.5 試験体では, デッキ上面のき裂は観察されなかったが, ストップホール設置後 250 万回の繰返し荷重を与えた時点で垂直スティフナ側止端から溶接ビード表面に向かってき裂が発生していることが確認された. そのき裂を図 4-11 に示す. その後 945 万回まで繰返し荷重を与えたが, 溶接ビード表面のき裂は進展しなかった. 疲労試験終了後にまわし溶接部近傍を切り出し, さらに垂直スティフナの板厚中心で切断することで, き裂の状況を観察した. この観察結果と疲労破面を図 4-12 に示す. デッキ側止端から発生・進展したき裂は深さ約 8mm まで進展して停留したと考えられる. また,

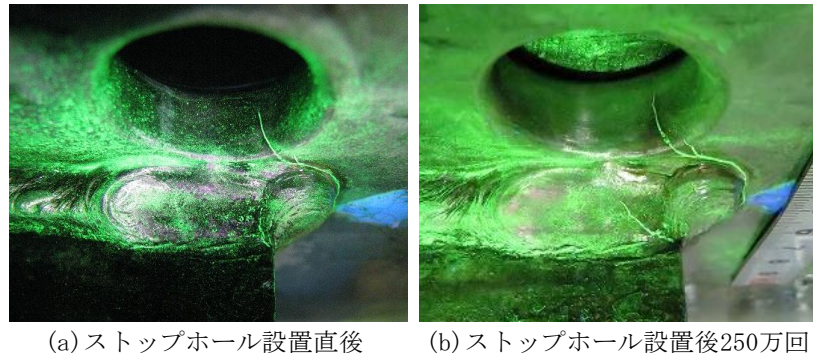


図 4-11 デッキ未貫通試験体のき裂例 (No.5L)

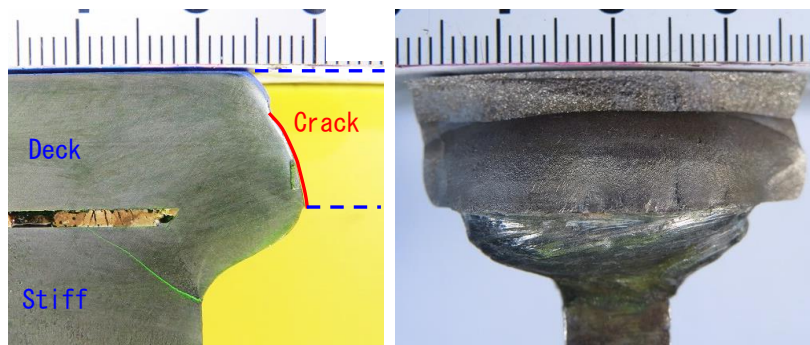


図 4-12 No.5L 試験体のき裂

図 4-11 で観察された溶接ビード表面のき裂は、ルートからではなく、垂直スティフナ側止端から発生・進展したものであり、ルートに到達した時点で停留したと考えられる。なお、第 3 章の検討から、のど厚が小さいと垂直スティフナ側止端およびルート部の応力が高くなることを確認しており、No.5 試験体ではルートギャップを有することでのど厚が小さかったためにスティフナ側止端からき裂が進展した可能性がある。

4.3 試験体の応力解析

4.3.1 解析における疲労破面の接触条件の検討

垂直スティフナ溶接部のき裂は、垂直スティフナの拘束によるデッキの局所的な曲げ変形で発生する圧縮応力が原因で生じる。そのため、発生したき裂の破面が接触により力を伝達している可能性がある。ここでは、試験体の応力計測結果と比較することで、ストップホールが設置されたモデルの解析において、どのように疲労破面の接触条件を設定するのが適切かを検討した。なお、き裂がデッキを貫通して、さらにストップホール間を貫通するまではき裂の大きさが特定できないため、き裂が貫通した後の状態を対象に比較を行った。

検討に用いた解析モデルの要素分割図を図 4-13 に示す。解析モデルは第 3 章や第 4 章と同様、対称性を考慮して試験体の 1/4 モデルとした。実際のき裂は、図 4-10(b)のようにデッキ板厚方向には橋軸直角方向に対して曲がりながら進展している。また、

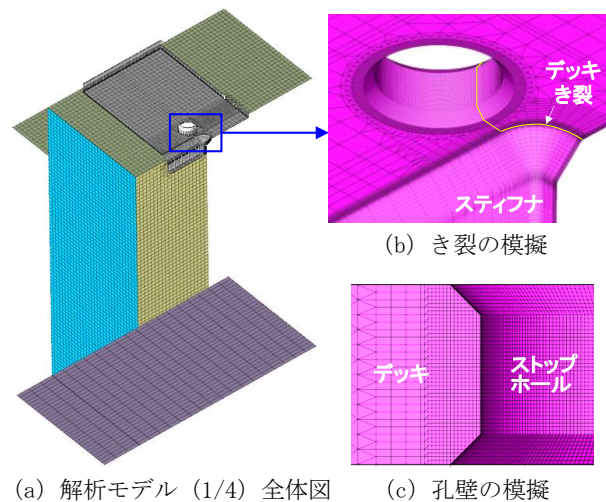


図 4-13 デッキ貫通き裂にストップホールを設置した解析モデル

溶接による引張残留応力により，き裂は微小な開口幅を有しているものと思われる．しかし，簡単のため，ここでの解析においては，まわし溶接部分ではデッキ側止端に沿って，母材表面部分では橋軸方向に直線でモデル化し，鉛直方向にも直線的にデッキを貫通しているものとした．また，き裂は開口幅を 0 として 2 重節点で模擬した．ストップホールは試験体と同様に，直径を 22mm，外側孔壁間隔を 80mm とした．図 4-13(c)に示すようにデッキ上下面の面取り量は 2mm とし，その角度は 45°としてモデル化した．ストップホール近傍の要素サイズは 0.25mm である．なお，解析は弾性解析とし，弾性係数を $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ，ポアソン比を 0.3 として，30kN の荷重を載荷した．応力解析のプリポストには MidasNastranFX，ソルバには NEiNastran を用いた．

検討したき裂面の接触条件は，①一体（き裂なし），②接触，③非接触の 3 ケースとした．①一体は，2 重節点で模擬したき裂面の対になる節点と同じように動く条件を与えたケース，②接触は，ペナルティ法により接触面間で要素が離れている場合には干渉しないが，重なる場合には鋼材と同じ弾性係数を有する仮想バネが押し戻し，対になる面に 0.0001mm 以上貫入しない条件を与えたケース，③非接触は，き裂面に接触条件を与えないことで，接触面間の要素が重なってもそれらが干渉しないケースである．なお，②接触ケースにおいて，接触時のすべり係数は明らかでないため，仮に文献[7]に示されているブラストによって粗面とした場合のすべり係数と同じ 0.35 を定義した．

図 4-14 にストップホール壁から 3mm 離れたデッキ上下面で測定した応力と解析より求めた応力を示す．解析結果において，それらの位置の橋軸直角方向と直行する方向の応力は十分に小さく，応力の多軸性は認められないことから，応力は計測されたひずみに弾性係数 $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ を乗じて算出している．なお，No.4 L では，き裂をソーカットで模擬しており，No.3 試験体ではデッキ下面の LE,RE は計測していない．き裂面を一体とした場合の解析値は，上下面とも実験値よりも低くなっている．接触および非接触とした場合には，一体とした場合よりも応力は上下面とも高くなり，実

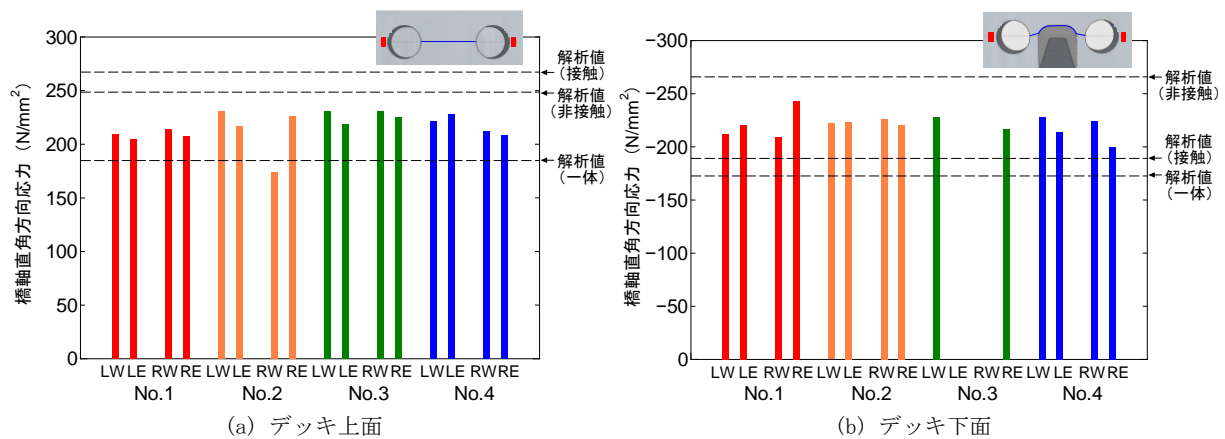


図 4-14 ストップホール近傍のデッキ応力の実験値と解析値の比較

験値に近づく傾向にある。しかしながら，非接触では上下面の応力が同程度であり実験値の傾向と同じであるが，接触では下面よりも上面で応力が高く，実験値とは異なる傾向を示している。また，き裂の再発生の検討において着目すべき上面側の引張応力も非接触のほうが実験値に近い。これらの結果から，ここで用いたストップホールを設置した解析モデルでは，疲労破面の接触を考慮しない条件が試験体の応力状態を最もよく再現していると考えられる。接触を考慮したモデルで実験値と異なる傾向になったのは，解析におけるき裂形状のモデル化が不完全であり，また，溶接による引張残留応力や破面の接触状況を十分に再現することができていないためと考えられる。4.3.2 項と 4.3.3 項の検討では，疲労破面の接触を考慮しない条件で解析を行った。

4.3.2 ストップホール壁応力に対する面取りサイズとストップホール径の影響

ストップホール壁の応力に対する面取りサイズの影響を調べる。なお，1 つの円孔を有する平板の板曲げを対象とした面取りの効果については文献[8]により検討されており，面外曲げを受ける場合には面取りが応力集中係数を低下させるとされている。

ストップホール径を 22mm として，面取り量を 0mm，1mm，2mm，3mm と変化させた解析を行った。面取り量 0mm でのストップホール壁の最大主応力コンターを図 4-15 に示す。面取り量 0mm でのストップホール壁の最大応力は，円孔中心を基準として垂直スティフナ側に 8.4°傾いた上縁部に生じており，その値は 320N/mm² である。垂直スティフナ側に傾いた位置に生じているのは，デッキ中央に載荷された荷重が，両端にストップホールを有するき裂部分を迂回して垂直スティフナに伝達されている影響と考えられる。

図 4-16 に示す変形図からは，ストップホール周辺には，橋軸直角方向の曲げに加えて，橋軸方向にも曲げが発生していることがわかる。面取り量 2mm でのストップホール壁の最大主応力コンターを図 4-17 に示す。円孔中心を基準として垂直スティフナ側に 8.4°傾いた位置の応力は 311N/mm² であり，面取りを施すことで若干低減されている。しかし，25.3°傾いた位置の面取り面において最大応力 324 N/mm² が生じている。表 4-3 に，面取り量 0mm，1mm，2mm，3mm における最大応力の値と発生位置を示す。

面取り量を変えても最大応力はほぼ同じである．最大応力の発生位置は，いずれも面取り面ほぼ中央であるが，その周方向位置は面取りが大きくなるにつれて垂直スティフナ側に傾く傾向がみられる．面取り量を大きくしても応力集中を低減する効果は小さいため，鋼床版垂直スティフナ溶接部のストップホールでは施工品質の確保を目的とした面取りを施せばよいと考えられる．

面取り量を 2mm として，ストップホール径を 18mm，20mm，22mm，24mm と変化させた解析を行った．表 4-4 に，各ストップホール径での最大応力の値と発生位置を示す．ストップホール径が大きくなるに従って最大応力は低下している．しかし，それらの差は小さく，直径 18mm と 24mm を比較しても 15%程度である．なお，最大応力の発生位置はいずれもほぼ同じ位置である．

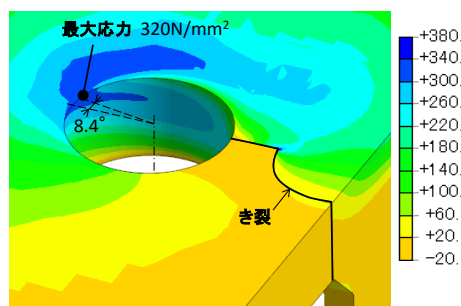


図 4-15 最大主応力コンター
(面取り量 0mm)

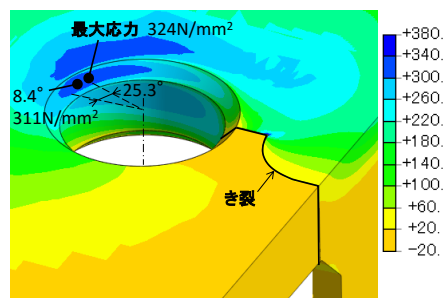


図 4-17 最大主応力コンター
(面取り量 2mm)

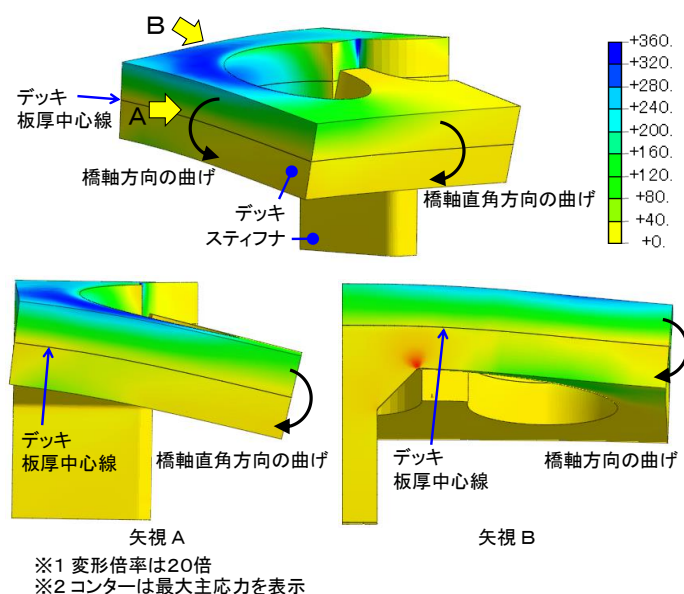


図 4-16 ストップホール近傍の変形図

表 4-3 面取り量による応力の変化

面取り量	0mm	1mm	2mm	3mm
最大応力 (N/mm ²)	320	316	324	325
最大応力発生位置 角度(°)※1	8.4	19.7	25.3	42.2
最大応力発生位置 鉛直方向位置(mm)※2	0.00	0.50	1.00	1.25

※1. 円孔中心を基準とした垂直スティフナー側への角度
※2. デッキ上面からの鉛直方向距離

表 4-4 ストップホール径による応力変化

ストップホール径	18mm	20mm	22mm	24mm
最大応力 (N/mm ²)	355	338	324	311
最大応力発生位置 角度(°)※1	26.7	28.1	25.3	25.3
最大応力発生位置 鉛直方向位置(mm)※2	1.00	1.00	1.00	0.75

※1. 円孔中心を基準とした垂直スティフナー側への角度
※2. デッキ上面からの鉛直方向距離

4.3.3 ストップホールの設置がき裂の発生・進展に及ぼす影響

ストップホールの設置がデッキ下面からのき裂の進展およびデッキ上面からのき裂の発生を早める可能性が考えられたため、デッキ未貫通き裂を有する解析モデルをストップホール設置前と設置後について作成し、き裂深さ方向先端の応力拡大係数（K 値）とデッキ上面の応力を求めた。

解析モデルの要素分割図を図 4-18 に示す。き裂は深さ 8.0mm、長さ 50mm（アスペクト比 0.32）の半楕円形とした。板厚方向き裂先端部の要素サイズは 0.25mm である。き裂先端の K 値は、き裂先端から 0.25mm、0.50 mm 離れた 2 点の K 値をそれぞれ変位法で求め、さらにそれらをき裂先端に外挿することにより算出した。

解析結果を図 4-19 に示す。き裂先端の K 値はストップホール設置前で $631\text{N/mm}^{3/2}$ 、設置後で $895\text{N/mm}^{3/2}$ であった。また、デッキ上面の橋軸直角方向応力はストップホール設置前で 500N/mm^2 、設置後で 630N/mm^2 であった。したがって、ストップホールの設置により、デッキ下面から生じた疲労き裂の進展およびデッキ上面からのき裂の発生が早まるものと考えられる。

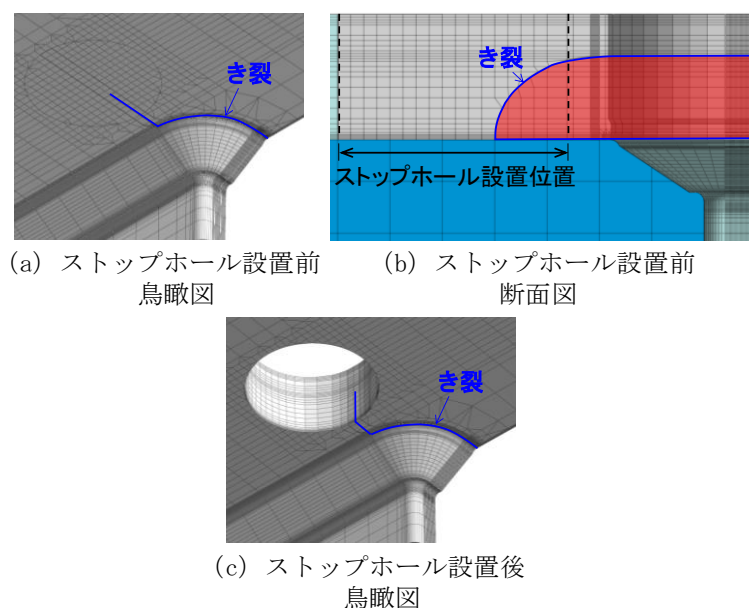


図 4-18 デッキ未貫通き裂にストップホールを設置した解析モデル

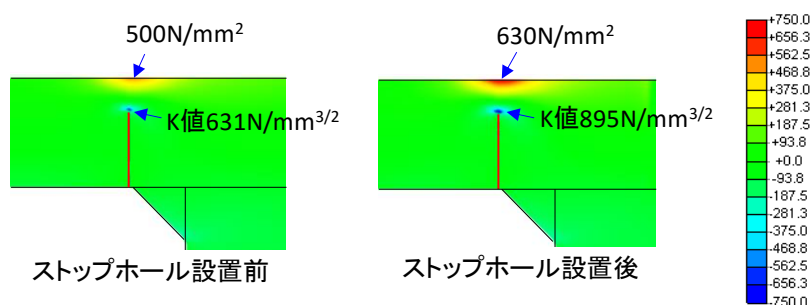


図 4-19 ストップホール設置前後のき裂先端の応力拡大係数とデッキ上面応力

4.3.4 垂直スティフナ側止端からのき裂の発生・進展の原因

実験ではデッキと垂直スティフナに 1mm のルートギャップを有する No.5 試験体において，ストップホール設置後にデッキ側止端のき裂が停留し，垂直スティフナ側止端のき裂がルートギャップまで進展した．そのき裂が進展した原因を推定する目的で，ルートギャップの有無，デッキ側止端のき裂の進展，ストップホールの設置が試験体各部の応力に及ぼす影響について検討した．なお，4.3.1 項ではき裂がデッキを貫通した No.1～4 試験体の実験値と比較することで，疲労破面の接触を考慮しない条件の解析が試験体の応力状態を最もよく再現できると考えた．しかし，No.5 試験体のき裂進展性状は他の試験体と異なっており，それには疲労破面の接触状態の違いが影響している可能性もある．そのため，本検討では疲労破面の接触を考慮しない条件と考慮した条件で解析を行った．

検討に用いた解析モデルはルートギャップなしのモデルと 1mm のルートギャップを有するモデルで，デッキ側止端のき裂発生前，き裂発生後，ストップホール設置後の三段階でモデル化した．着目部の要素分割図を図 4-20 に示す．溶接止端部とルート部には，半径 1mm の円孔を設けることで Effective Notch Stress[9]を求めた．円孔先端近傍の要素サイズは 0.1mm である．き裂の大きさは 4.3.3 項と同サイズとし，き裂先端近傍とデッキ上面の要素サイズは 0.25mm とした．

き裂発生前の段階においてルートギャップの有無によるスティフナ側止端の応力を求めたところ，ルートギャップなしでは -1237N/mm^2 ，ルートギャップ 1mm では -1399N/mm^2 であり，ギャップありで 13%大きかった．なお，デッキ側止端の応力はルートギャップなしでは -828N/mm^2 ，ルートギャップ 1mm では -825N/mm^2 とほぼ同じであった．表 4-5 にルートギャップ 1mm のモデルのデッキ側止端き裂の発生前，発生後，ストップホール設置後の各着目部の応力を示す．破面の接触を考慮しない場合，スティフナ側止端の応力はデッキ側止端のき裂が発生することで低下し，その後ストップホールを設置することで若干増加するが，き裂発生前よりは低い応力となる．破面の接触を考慮した場合には，き裂先端やデッキ上面の応力が低くなり，スティフナ側止端やルートの応力はき裂の発生前後では同程度，ストップホール設置後には増加する．

この解析では，き裂の形状や残留応力等が模擬できていないため，試験体の状態を

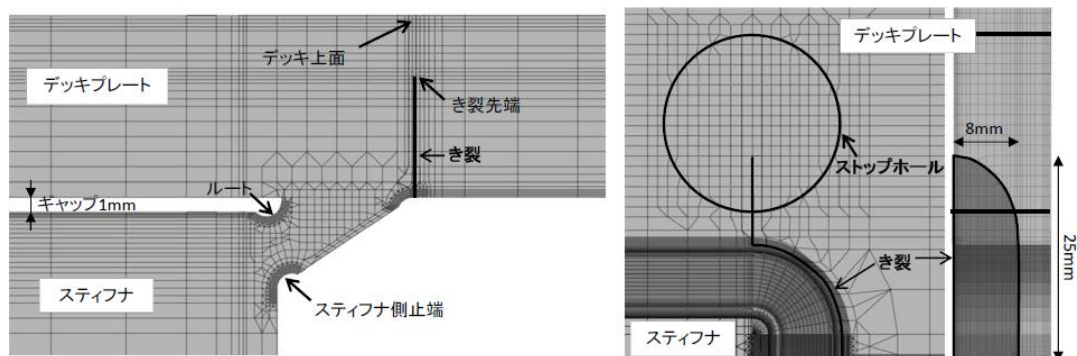


図 4-20 垂直スティフナ側止端のき裂進展の原因を調べるための解析モデル

表 4-5 ルートギャップ 1mm モデルの解析結果

着目部	き裂なし	デッキプレート側止端き裂あり			
		破面接触なし		破面接触あり	
		SH前	SH後	SH前	SH後
スティフ側止端	-1399	-1077	-1132	-1324	-1437
ルート	-737	-664	-686	-732	-779
き裂先端※	-	-763	-1059	-314	-359
デッキ上面	261	499	629	345	403

※き裂先端にはエフェクティブノッチを設けていないため参考値 (N/mm²)

精微に再現できているわけではないが、解析の結果から、No.5 試験体では疲労破面の接触がデッキ側止端に生じたき裂先端の応力を低下させたため、そのき裂の停留を引き起こし、また、ルートギャップによりのど厚が小さかったことやストップホールの設置がスティフナ側止端の応力を増加させたため、スティフナ側止端のき裂が進展した可能性がある。

4.4 疲労耐久性評価のための疲労強度曲線

4.4.1 検討方法

ストップホールで補修した部材の疲労耐久性を評価するための疲労強度曲線について、既往の疲労試験データ[2,3,4]を基に検討する。

既往の疲労試験に用いられた試験体の一覧を表 4-6 に、それらの試験体の形状を図 4-21 に示す。なお、表 4-6 で切欠き長さが記入してあるものは図 4-21(b)に示す眼鏡形切欠きの試験体である。表 4-6(a)に示す試験体はホールソーで円孔を開けたままのものであり、これらを NF 試験体と呼ぶ。また、表 4-6(b)に示す試験体は#80～#220 のゴム砥石で仕上げたものであり、これらを F 試験体と呼ぶ。なお、#80 と#220 のゴム砥石で仕上げたストップホールを有する鋼材の疲労強度はほぼ同じであることが確認されている[4]。F 試験体の数が少ないため、ここでは試験体数が多い NF 試験体の疲労試験データを整理したうえで、仕上げによる強度向上分を考慮した疲労強度曲線を提案する。

表 4-6 既往の疲労試験体一覧

(a) NF 試験体						
試験体	材質	板厚 (mm)	板幅 (mm)	円孔径 (mm)	切欠き長さ (mm)	試験体数 (体)
①	SM400	12	150	18	70	6
②	SM490	12	150	18	70	6
③	SM490A	9	150	24.5	70	9
④	SM490Y	12	150	18	70	9
⑤	SM490Y	25	150	18	70	6
⑥	SM490Y	12	150	18	100	5
⑦	SM490Y	12	120	18	-	8
⑧	SM570	12	150	18	70	6
⑨	WEL-TEN780	12	150	18	70	6
(b) F試験体						
試験体	材質	板厚 (mm)	板幅 (mm)	円孔径 (mm)	切欠き長さ (mm)	試験体数 (体)
①	SM400A	6	150	18	70	6
②	SM490A	9	150	24.5	70	14

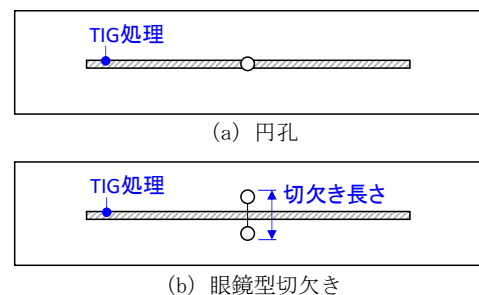


図 4-21 試験体の形状

4.4.2 疲労耐久性評価と基準疲労強度曲線の提案

NF 試験体の総数は 61 である．既往の研究[2]によれば，ストップホールで補修した部材の疲労強度は，切欠き形状，鋼材，板厚が変わってもストップホールによる応力集中を考慮したストップホール壁の応力範囲 $\Delta\sigma_s$ （図 4-22）で整理できるとされている．表 4-6（a）に示す NF 試験体の $\Delta\sigma_s$ -N 関係を図 4-23 に示す．図中の実線は最小二乗法によって求めた疲労寿命 N に対する $\Delta\sigma_s$ の回帰直線，点線はそこから 2 標準偏差離れた位置の $\Delta\sigma_s$ -N 関係である．なお，疲労限は破断していないデータの応力範囲を考慮して疲労寿命 200 万回に対応するものとした．

ストップホール壁を仕上げた F 試験体の $\Delta\sigma_s$ -N 関係を図 4-24 に示す．F 試験体は試験体数が 20 と少ないため， $\Delta\sigma_s$ -N 関係の傾きと標準偏差を NF 試験体と同じとした．この $\Delta\sigma_s$ -N 関係を用いて孔壁を仕上げたストップホールで補修した部材の疲労耐久性評価を行うことを提案する．

図 4-24 中には，2 章で示した小型試験体 5 体の疲労試験結果も示している．なお，これらの試験体のストップホール壁の応力範囲は 4.3 節の FEM 解析から求めた値である．実験結果は，F 試験体の平均値から 2 標準偏差離れた $\Delta\sigma_s$ -N 曲線より下に位置しており，小型試験体の実験においてストップホール壁よりき裂が生じなかったことと対応している．

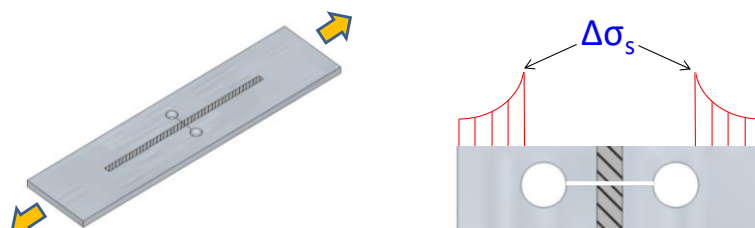


図 4-22 応力集中を考慮したストップホール壁の応力範囲 $\Delta\sigma_s$

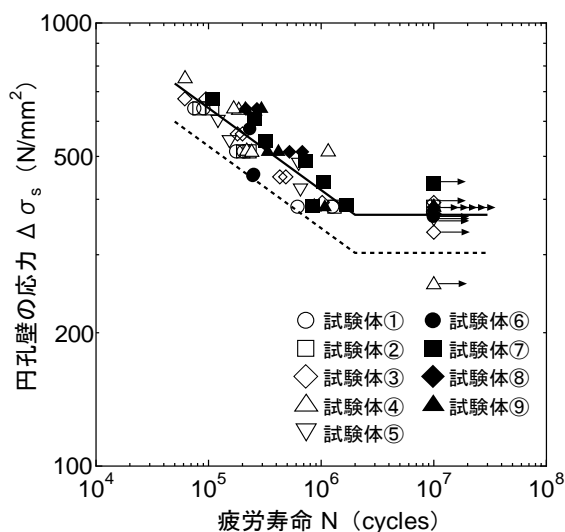


図 4-23 $\Delta\sigma_s$ -N 関係（仕上げなし）

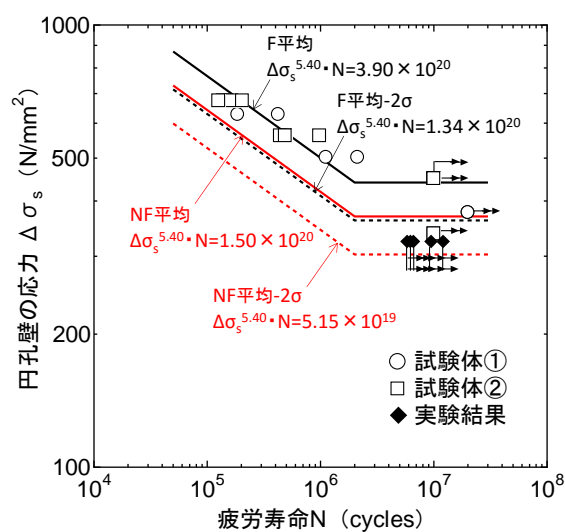


図 4-24 $\Delta\sigma_s$ -N 関係（仕上げあり）

以上より，孔壁仕上げなしおよび孔壁を仕上げたストップホールで補修した部材の疲労強度曲線を以下のように提案する．

$$\begin{aligned} \text{仕上げなし：} \Delta \sigma_s^{5.40} \cdot N &= 5.15 \times 10^{19} & (1) \\ & (2 \times 10^6 \text{回疲労強度：} 302 \text{N/mm}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{仕上げあり：} \Delta \sigma_s^{5.40} \cdot N &= 1.34 \times 10^{20} & (2) \\ & (2 \times 10^6 \text{回疲労強度：} 361 \text{N/mm}^2) \end{aligned}$$

なお，これらの疲労強度曲線におけるストップホール壁の応力範囲 $\Delta \sigma_s$ は，実橋での応力計測から求めることが考えられる．ストップホール壁で応力測定を行うことが困難な場合には，ストップホール壁での応力と関係性の高い部位で応力計測を行い，それに基づいてストップホール壁での応力範囲を推定することも考えられる．構造解析によって求めることも考えられるが，その際には荷重の大きさや位置について十分な検討が必要と考えている．

4.5 まとめ

本章では，鋼床版垂直スティフナ溶接部のデッキ側止端に生じた疲労き裂に対するストップホール法の効果を明らかにすることを目的として小型試験体の疲労試験と応力解析を行った．また，ストップホール法で補修した場合の疲労耐久性評価を行うための疲労強度曲線について検討した．ここで得られた結果は以下のとおりである．

- (1) 疲労き裂をストップホールで補修した小型試験体の疲労試験を行い，デッキの疲労き裂に対してストップホール法が高い補修効果を有することを確かめた．
- (2) 鋼床版垂直スティフナ溶接部の疲労き裂先端に設けたストップホールの面取りを施しても，応力集中係数の低減効果はない．また，ストップホールの径を大きくすることによる応力低減効果の改善もさほど大きなものではない．
- (3) デッキ未貫通き裂に対してストップホール補修を行うことで，デッキ下面から生じた疲労き裂の進展およびデッキ上面からのき裂の発生は早まる．
- (4) 既往の疲労試験結果を整理することで，孔壁仕上げなしおよび孔壁を仕上げたストップホールで補修した部材の疲労耐久性を評価するための疲労強度曲線を提案した．また，実験データと比較することでその有効性を確かめた．

【参考文献】

- [1] 森猛，原田英明，大住圭太，平山繁幸：鋼床版垂直スティフナ溶接部に生じる疲労き裂の補修・補強方法，鋼構造論文集，Vol.18，No.69，pp.51-59，2011.
- [2] 内田大介：ボルト締めストップホール法により補修したガセット溶接接手部の疲労強度評価方法に関する研究，法政大学学位論文，2006.
- [3] 森猛，白井聡也，佐々木一哉，中村充：添え板ボルト締めストップホール法による主桁横桁交差部の疲労き裂の補修，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.67，No.3，pp.493-502，2011.
- [4] 廣戸一也，森猛，小杉剛史，平野秀一，盧相坤：ストップホール壁の表面粗さが疲労強度に及ぼす影響，鋼構造年次論文報告集，Vol.18，2010.
- [5] 土木学会：鋼構造シリーズ 19 鋼床版の疲労[2010 改訂版]，pp.63-71，2010.
- [6] 高田佳彦，川上順子，酒井優二，坂野昌弘：半円切欠きを用いた既設鋼床版橋主桁垂直補剛材上端溶接部の疲労対策，鋼構造論文集，Vol.16，No.62，pp.35-46，2009.
- [7] 土木学会：鋼構造シリーズ 15 高力ボルト摩擦接合接手の設計・施工・維持管理指針（案），pp.35-44，2006.
- [8] 大倉一郎，塩崎哲也，中西芳文：膜応力と板曲げ応力を受けるストップホールの疲労強度，土木学会論文集，No.537/I-35，pp.327-338，1996.
- [9] Hobbacher, A. : IIW Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, WRC Bulletin 520, The Welding Research Council, New York, 2009.

第 5 章 実橋への適用性の検討

5.1 はじめに

第 2 章～第 4 章では、図 2-6 に示す、垂直スチフナ上端溶接部を模擬した小型試験体を対象に疲労試験や応力解析を行うことで、疲労き裂の発生・進展性状や、UIT やストップホールといった補修の効果について検討した。しかし、それらの検討に用いた試験条件が、実際に疲労き裂が生じている実橋の応力性状を模擬できているかは明らかではなく、補修方法を適用するには、それらの試験条件が実橋の載荷条件やそれに伴う応力性状をどの程度再現できていたのかを明らかにする必要がある。

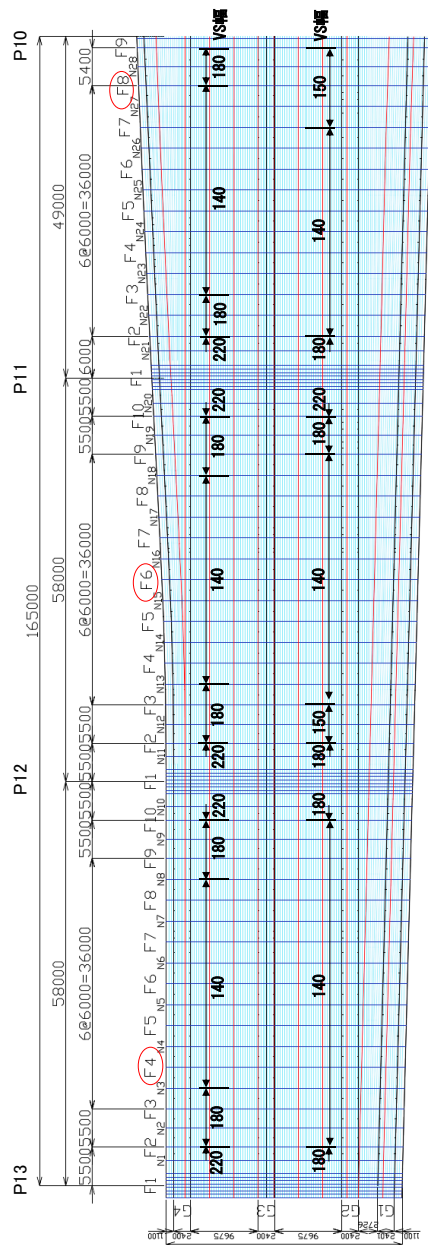
本章では、実際に疲労き裂が生じている橋梁の発生応力を実橋モデルの応力解析から求め、第 2 章～第 4 章で用いた試験体モデルの応力解析結果と比較することで、これまでの検討に用いた試験条件が実橋のどのような荷重条件を再現していたのかを明らかにする。さらに、第 3 章で検討した UIT と第 4 章で検討したストップホールを実橋に適用する際の施工手順と施工管理方法について、これまでの検討から得られた結果を基に整理する。

5.2 試験体における実橋の再現性の検討

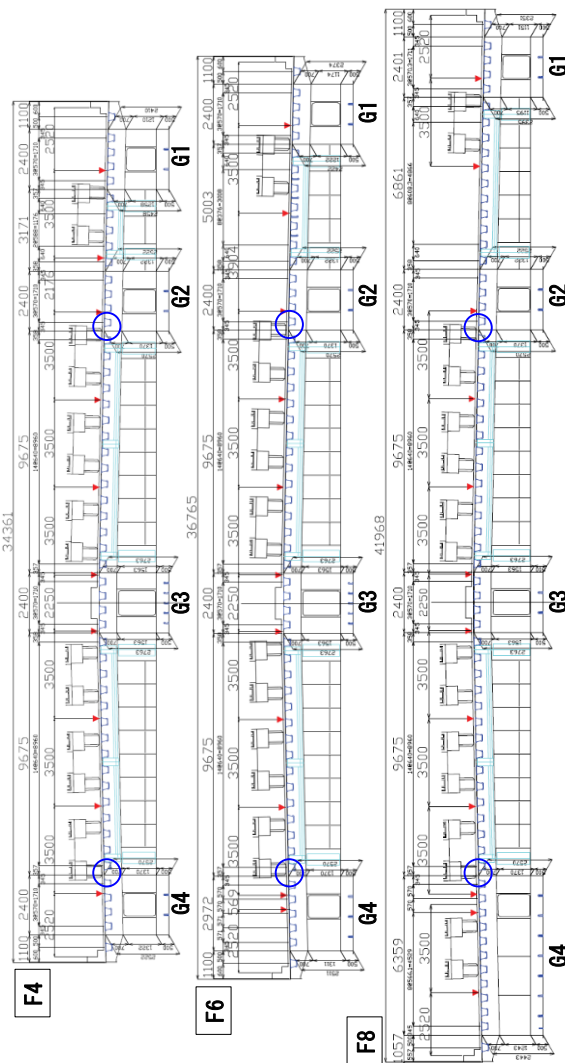
5.2.1 対象橋梁の構造概要と損傷発生状況

実橋解析で対象とした A 橋の構造概要を図 5-1 に示す。A 橋は 1994 年に供用開始された 3 径間連続鋼床版箱桁橋で、主桁数は 4 本、橋長は 165m (58m, 58m, 49m) である。G3 桁上に中央分離帯を配した 6 車線の本線に加え、その両脇に道路の分合流のための車線がそれぞれ配置されている。本線は直線であるが、車線が分合流する影響により橋軸方向で幅員が変化している。縦リブには U リブが用いられており、その幅は 320mm、高さは 240mm、板厚は 6mm で、箱桁内には 570mm 間隔で配置されている。垂直スチフナは、箱桁内に約 3m 間隔で設置されるダイヤフラムと横リブの間に 1 つを基本に取り付けられている。支点部近傍では垂直スチフナの断面が大きくなっており、支間中央で 140mm (幅) × 11mm (板厚) が用いられているのに対して、支点部近傍では最大で 220mm × 17mm の鋼板が用いられている。それらの配置状況を図 5-1(a) に示す。なお、箱桁ウェブと U リブの間隔は 185mm で、垂直スチフナの幅が 150mm 以上の場合には、U リブと干渉しないように図 5-1(c) に示すようにスチフナ上端部にテーパが設けられている。

観察された損傷は図 5-2 に示す 5 パターンである。損傷の多くは①、②、③の溶接止端から生じたものであり、デッキ側とスチフナ側の両止端に併せて発生している場合が多い。ルートを起点に発生したと思われる④、⑤も数か所で観察されている。図 5-3 にそれらのき裂発生位置図を示す。輪載荷位置近傍の垂直スチフナに多くに疲労き裂が発生している。図 5-4 にき裂の発生事例と発生数を示す。③のスチフナ側止端から進展するき裂よりも②のデッキ側止端から進展するき裂の方が発生数が多い。



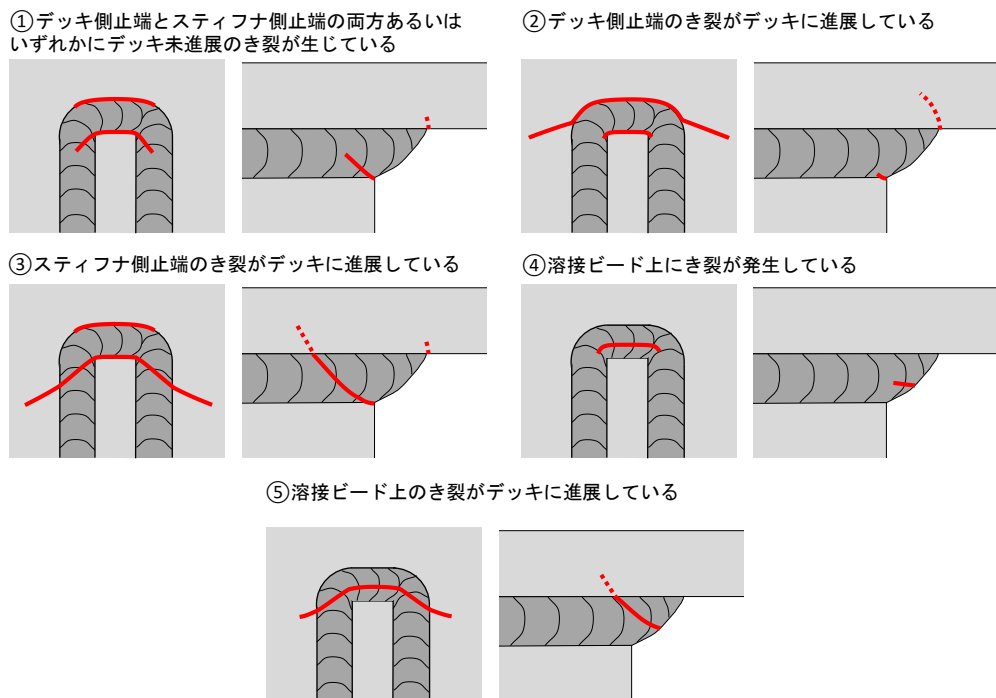
(a) 平面図



(b) 断面図

(c) 垂直スライフナ上端部

図 5-1 A 橋の構造概要



※側面図のデッキ進展き裂（点線）は進展イメージとして記載

図 5-2 疲労き裂発生パターン

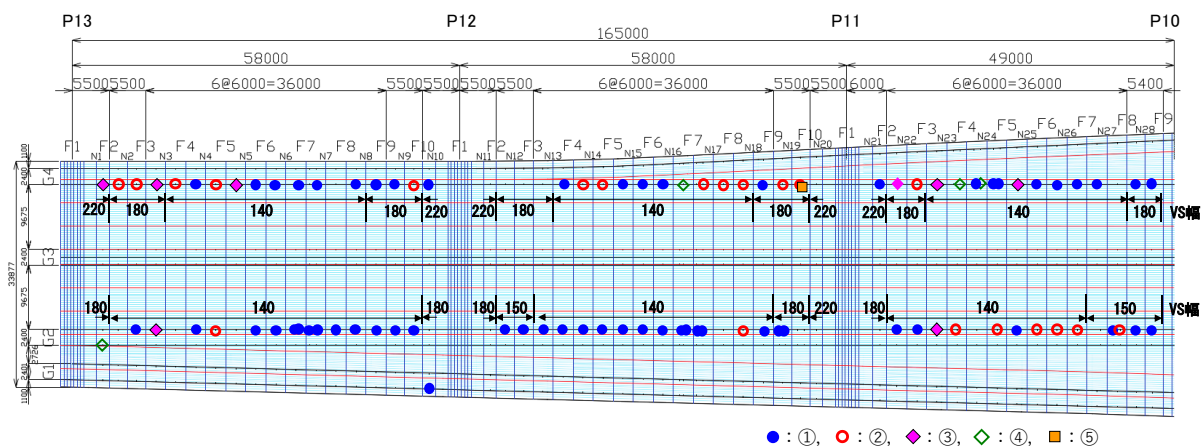


図 5-3 疲労き裂発生位置

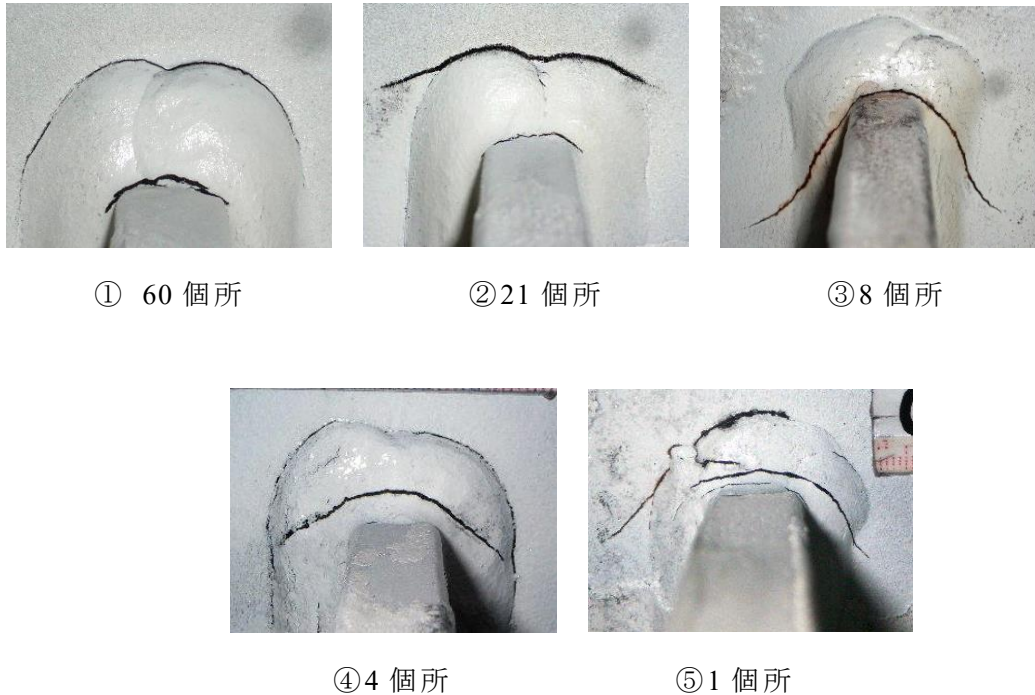


図 5-4 疲労き裂発生パターン別の発生事例と発生数

5.2.2 実橋の解析モデル

垂直スティフナ上端溶接部に疲労き裂が生じている G2 桁の G3 側ウェブに取り付けられている垂直スティフナを対象に，G2 桁と G3 桁の間を橋軸方向に 9m モデル化した．図 5-5 に解析モデルを示す．モデル化範囲はダイヤフラムが 2 断面，横リブが 2 断面配置された 3 格間の範囲で，着目部と舗装はソリッド要素，その他はシェル要素でモデル化している．ソリッド要素とシェル要素の結合は，ソリッド要素の側面に周囲のシェル要素と同じ板厚のシェル要素を貼り付けることにより行っている．舗装厚は 80mm，デッキ厚は 12mm，スティフナの幅は 140mm，板厚は 11mm である．着目部であるスティフナ上端部には等脚で三角形断面を有する溶接を模擬し，その要素寸法は 2mm としている．溶接部にルートギャップは設けず，一体構造を基本としてモデル化した．鋼材の弾性係数は $2 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ，舗装の弾性係数は文献[1,2]を参考に夏，春・秋，冬を対象にそれぞれ 500N/mm^2 , 1500N/mm^2 , 5000N/mm^2 とした．なお，ポアソン比は鋼材で 0.3，舗装で 0.35 としている．

荷重は重量 25ton の実車両をモデルに与えた．図 5-6 に，モデルとした 25ton 車両の寸法と重量を示す．前輪約 10ton，後輪約 15ton でそれぞれがタンデムで支えられている．前後輪間の距離が縦リブ支間よりも十分に長いため，ここでは後輪の 2 軸を載荷することとした．なお，タイヤ 1 つの面積は $200 \text{mm} \times 200 \text{mm}$ としている．橋軸直角方向の輪荷重載荷ケースを図 5-7，橋軸方向の載荷ケースを図 5-8 に示す．橋軸直角方向の載荷ケースは W01～W23 で，橋軸方向の載荷ケースは 11 ケースとした．

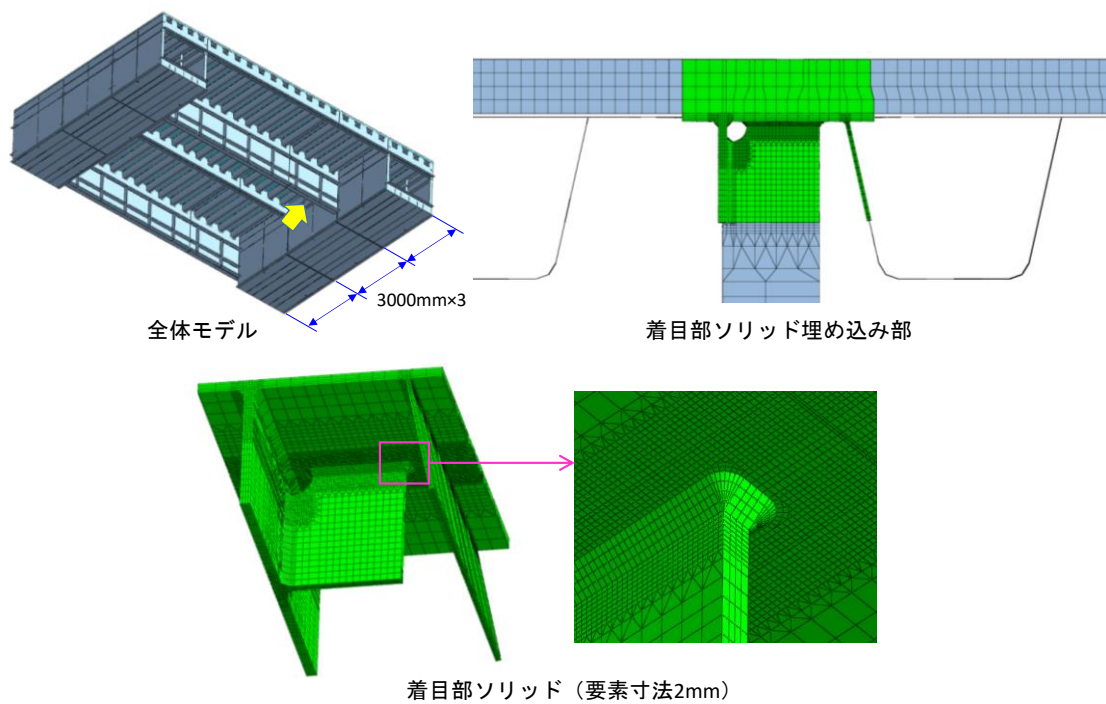


図 5-5 実橋応力解析モデル

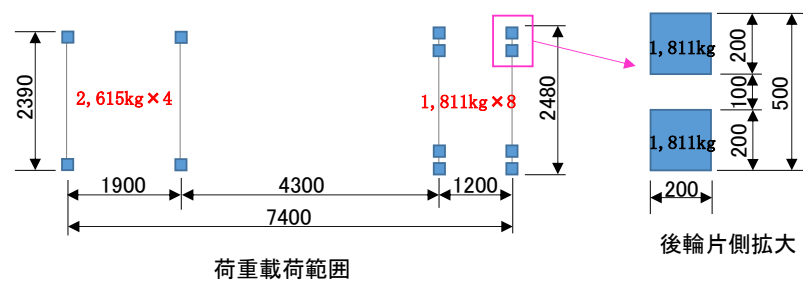
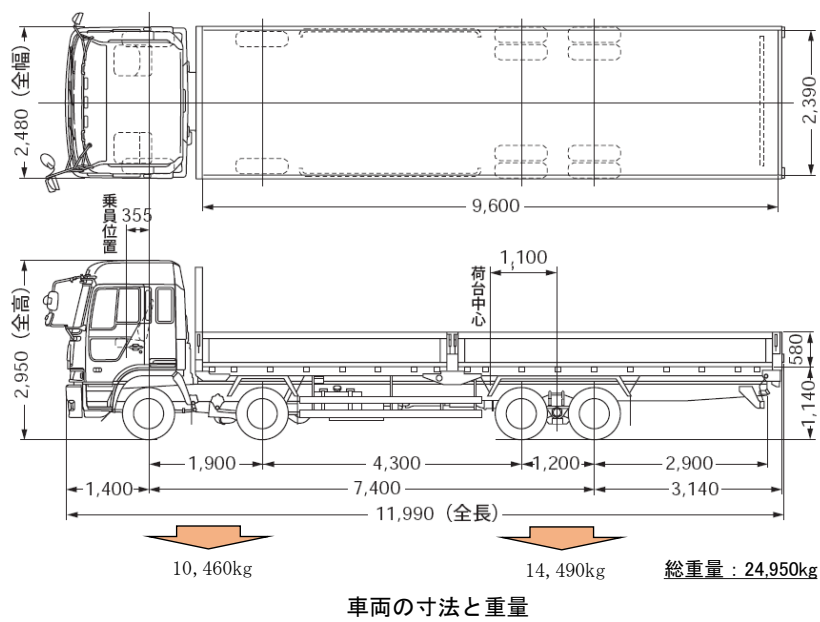
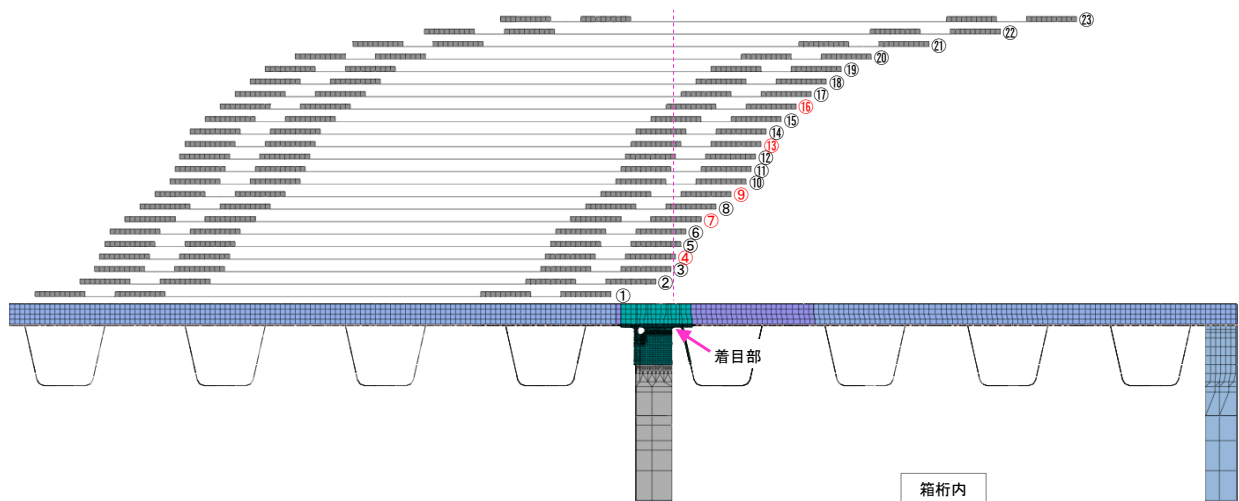
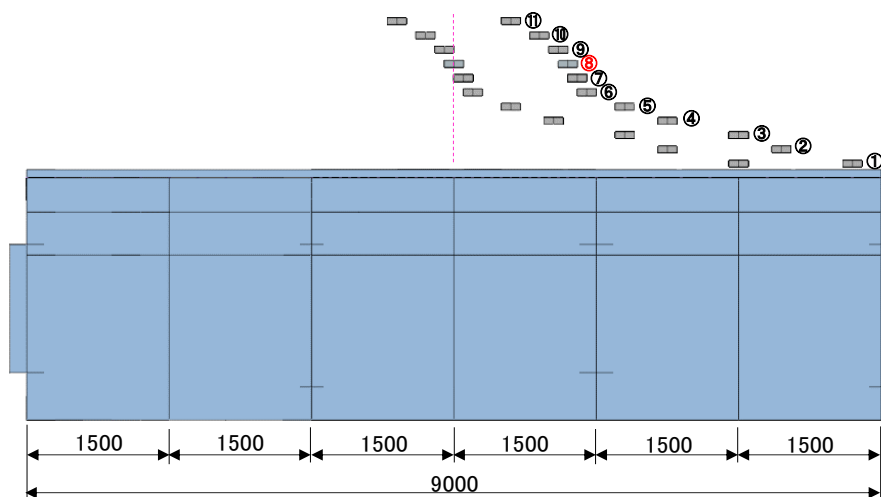


図 5-6 25ton 車両の寸法と重量



※赤字の載荷ケースは橋軸方向載荷を検討

図 5-7 橋軸直角方向の載荷ケース



※1. 赤字の載荷位置は前軸が垂直スティフナ直上
 ※2. 3000mmごとに横リブ、ダイヤフラムが設置されている

図 5-8 橋軸方向の載荷ケース

5.2.3 実橋モデルの応力解析結果

夏を想定した舗装剛性モデルを用いて、図 5-7 中に赤字で示す W04, W07, W09, W13, W16 の載荷ケースで、図 5-8 に示すように橋軸方向に移動載荷した際のデッキ側止端から 5mm 離れた位置と垂直スティフナ側止端から 5mm 離れた位置の応力の変化を図 5-9 に示す。なお、橋軸方向載荷位置が 3900mm でタンデムの前軸がスティフナ直上に載荷され、4500mm でタンデムの両軸の中央がスティフナ直上に載荷される。タンデムの両軸が着目部と隣接する横リブーダイヤフラム間に載荷されるケース①②③（グラフの橋軸方向載荷位置が 2100mm 以下）において応力はほとんど生じていないが、着目部が位置する横リブーダイヤフラム間に荷重が載荷されるケース④～⑪では応力が増加している。なお、いずれの載荷ケースでもデッキ側止端よりもスティフナ側止端の方が応力が高い。スティフナ側止端では 4500mm で応力が最大となるのに

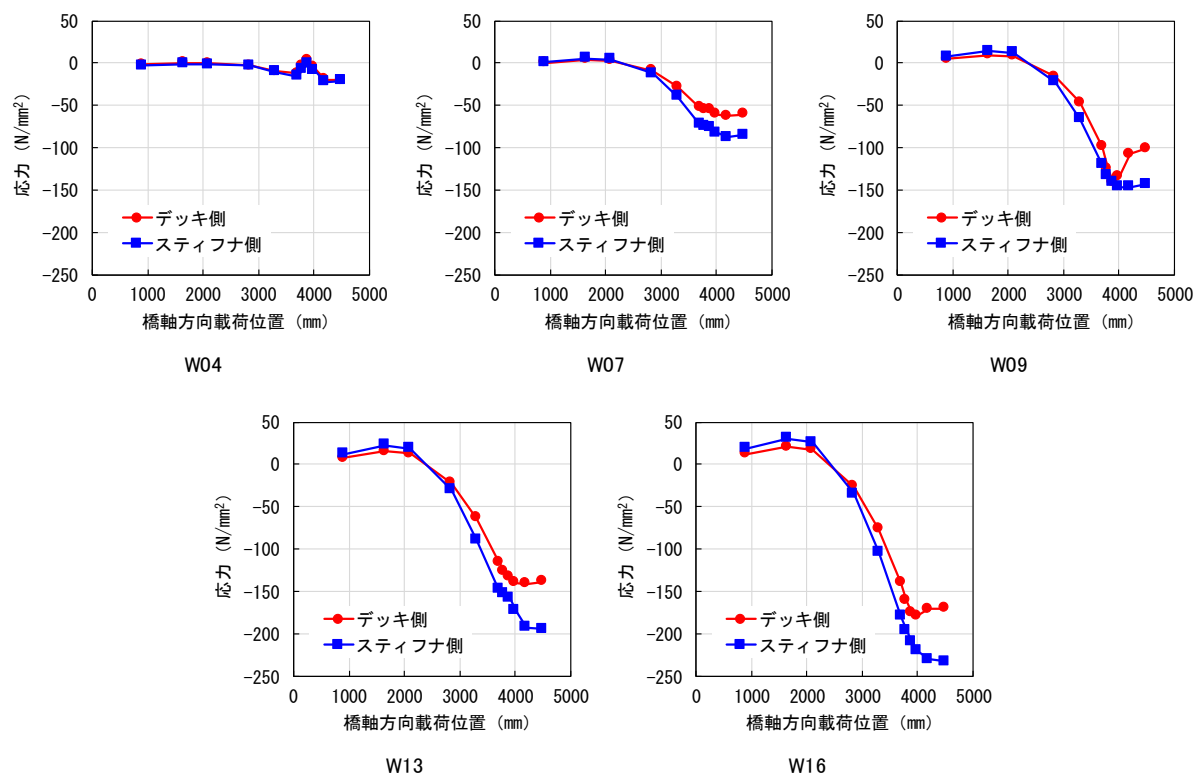
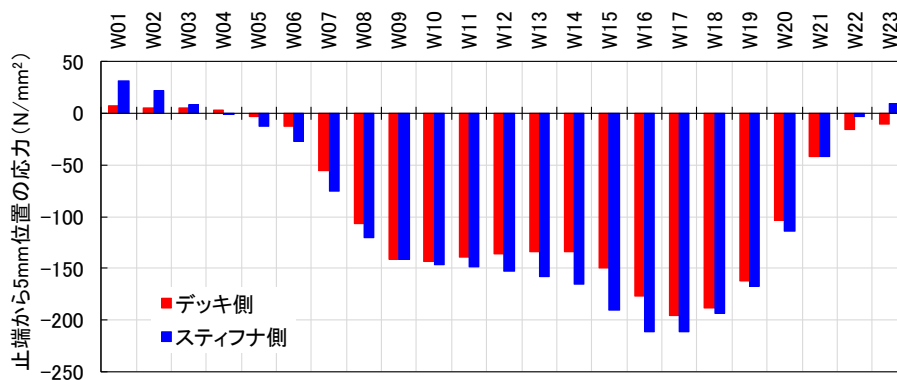


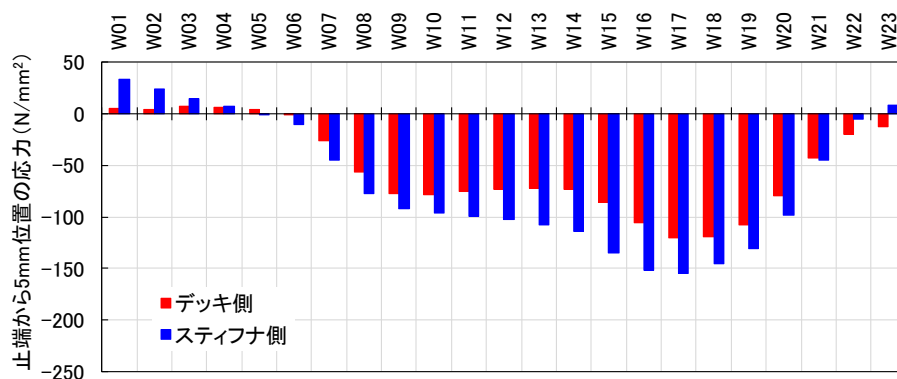
図 5-9 橋軸方向移動載荷による溶接止端応力の変化（夏）

対してデッキ側止端ではタンデムの前軸がほぼスティフナ直上となる 4000mm 付近で応力が最大となる。対象橋梁は，スティフナ側止端よりデッキ側止端の損傷数が多いため，デッキ側止端の応力が最大となるタンデムの前軸がスティフナ直上に荷重される条件で，橋軸直角方向の荷重ケースについて検討した。

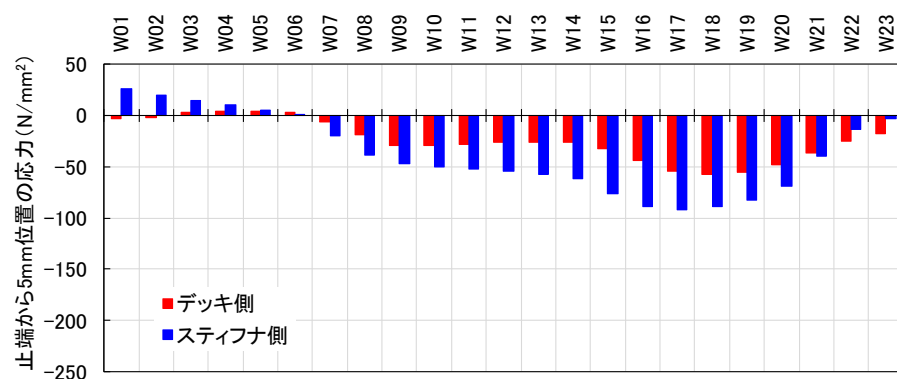
図 5-10 には，夏，春・秋，冬のそれぞれの舗装剛性で橋軸直角方向に荷重位置を変化させた場合の，デッキ側止端とスティフナ側止端の応力の変化を示す。いずれの条件でもデッキ側およびスティフナ側止端の応力が最大となるのは W16 あるいは W17 である。舗装の剛性が大きくなることで，応力は大幅に減少しており，特にデッキ側止端の応力の減少が顕著である。W01 から W23 までの変化をみると，応力は輪荷重がスティフナ直上よりも U リブ側に荷重されはじめる W07 から大きくなり，垂直スティフナから 1 つめの U リブ直上に荷重される W16, W17 で最大となる。そして，1 つめ U リブ直上から離れる W21 においては応力が大幅に減少している。垂直スティフナ上端溶接部においては，スティフナ近傍の U リブ上に荷重が荷重される場合に応力が高くなると考えられる。なお，片側の輪の中心がスティフナこぼ面の直上に位置する W15 およびその近傍への荷重では，デッキ側止端の応力に対するスティフナ側止端の応力の割合がより大きくなっており，他の荷重ケースよりもスティフナ側止端のき裂が進展しやすい可能性がある。



(a) 夏



(b) 春・秋



(c) 冬

図 5-10 橋軸直角方向荷重ケースによる溶接止端応力の変化

5.2.4 実橋と試験体の応力解析結果の比較

実橋モデルと第 2 章～第 4 章で用いた試験体モデルの応力解析結果を比較した。比較したのは、デッキ側止端部，垂直スチフナ側止端部，垂直スチフナ側止端から 5mm 離れた位置のスチフナ上部の応力分布である。なお，比較はデッキ側の応力が最大となった W17 の荷重ケースで行った。

図 5-11 に試験体モデルと春・秋の舗装剛性で W17 に 25ton を荷重した実橋モデル，およびその 1.5 倍の応力分布を示す。25ton の荷重で生じる実橋モデルの応力よりも試験体モデルの応力のほうが高いため，実橋モデルにおいてその 1.5 倍を算出したところ，スチフナ側止端とスチフナ上部の応力分布は試験体モデルと同程度となった。

デッキ側止端の応力分布については、溶接止端近傍では同程度であるが止端から離れると試験体モデルの方が高くなっており、実橋と試験体でデッキの剛性やサイズが異なるためと考えられる。スティフナ側止端およびスティフナ上部の応力分布の比較から、春・秋の舗装剛性を有する実橋に 37.5ton の車両が載荷された際と同程度の応力が試験体で再現されていたと考えられる。さらに、夏の舗装剛性で W17 に 25ton を載荷した実橋モデルの各応力分布と試験体モデルの応力分布を比較した結果を図 5-12 に示す。両者の応力分布はほぼ同程度であり、夏の舗装剛性で 25ton の車両が載荷された際に生じる程度の応力が試験体に生じていたといえる。

以上の解析結果から、第 2 章～第 4 章の試験体モデルを用いた検討が、春・秋の舗装剛性で 37.5ton 車両、夏の舗装剛性で 25ton 車両が載荷されるのと同程度の厳しい条件で行われていたことが明らかとなった。そのため、第 3 章と第 4 章で得られた UIT とストップホールの効果は実橋においても十分に期待できるものと考えられる。ただし、荷重条件が著しく厳しい橋梁に適用する場合には注意が必要である。

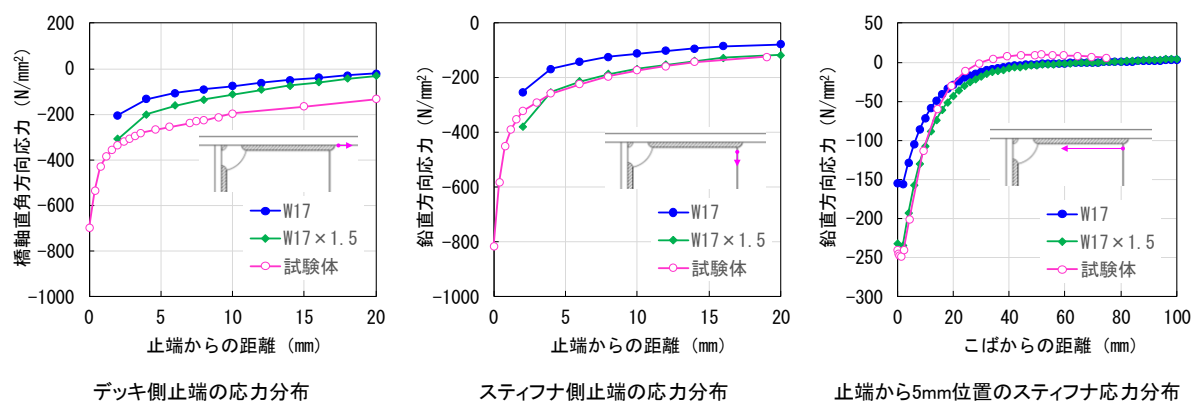


図 5-11 実橋モデル W17（春・秋）と試験体モデルの応力分布の比較

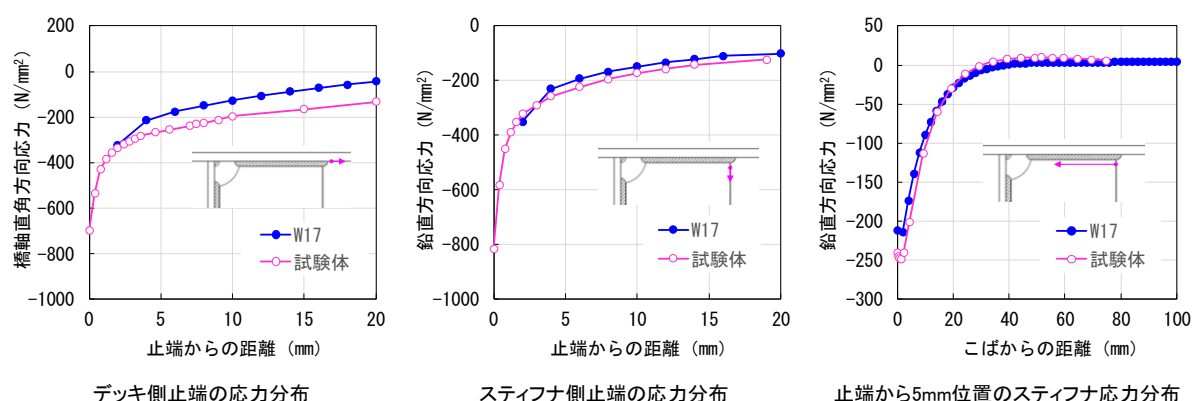


図 5-12 実橋モデル W17（夏）と試験体モデルの応力分布の比較

5.3 疲労き裂の補修方法と補修箇所の選定方法の提案

5.3.1 現状の調査方法と補修方法

比較的一般的と考えられる現状の疲労き裂に対する対応の流れを図 5-13 に示す。疲労き裂は、近接目視点検で発見された塗膜割れに対して、磁粉探傷試験を行うことで発見する。磁粉探傷試験を行うためには予め塗装を除去しなければならない。磁粉探傷試験で疲労き裂が発見されたら、き裂の発生状況に応じて補修対策を行う。例えば、現状では図 5-14 に示すような対策が実施されている。すなわち、き裂先端が溶接止端に留まる段階ではき裂の切削除去、き裂先端がデッキ母材まで進展している場合にはストップホールが施工される。また、溶接ビード内に生じているき裂に対しては、き裂の先端を除去するために溶接を削り込み、ルート部を露出する応急対策が取られている場合がある。

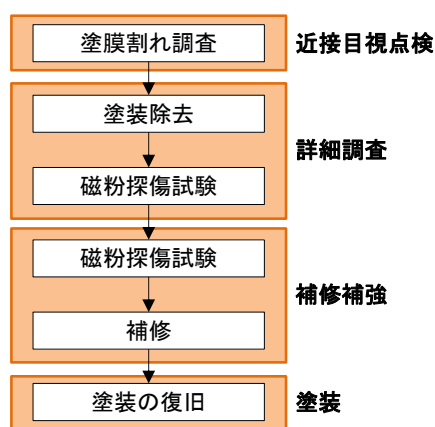


図 5-13 垂直スティフナ上端部の疲労き裂に対する一般的な対応の流れ

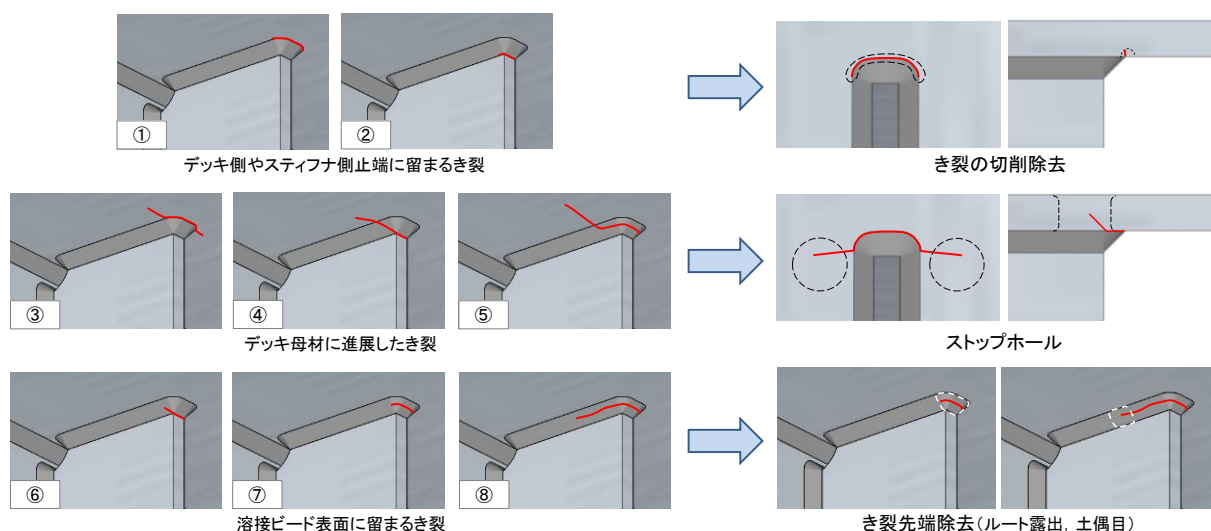


図 5-14 垂直スティフナ上端部の疲労き裂に対する従来の補修方法

5.3.2 新たに提案する補修方法と補修個所の選定方法

第2章の検討より，垂直スチフナ上端に生じるき裂はのど厚が著しく薄くならない限り溶接止端から発生すると考えられ，実橋においてもルート部を起点に発生したき裂の報告は少ない[3-9]．ここでは，溶接止端に生じるき裂を対象に，補修方法と補修個所の選定方法をまとめる．

第3章より溶接止端に留まるき裂に対するUITの効果が明らかとなった．そこで，溶接止端に留まるき裂に対しては，き裂の上からUITを施工することを提案する．き裂の切削除去は，磁粉探傷試験でき裂の長さや進展方向を観察しながら削り込みを行うため，作業に時間が掛かる，作業員の技量が必要，き裂が残存しないよう適切な施工管理が必要，き裂が深い場合にはデッキの減厚が大きくなるためき裂の再発生が懸念されるなど煩雑であった．UITを適用することで，比較的簡単な施工で，き裂が生じている部位に対しても，その切削除去より高い効果が得られると考えられる．

輪荷重走行位置近傍に垂直スチフナが配置される構造で，同一ラインに位置する垂直スチフナにいくつかの疲労き裂が生じ始めたら，いずれ同一ラインにある多くの個所に疲労き裂が発生する可能性が高いと考えられることから，予防保全としてUITを適用することが望ましい．その際には詳細調査の工程を省略することも考えられる．また，将来的に，塗装上からUITを施工しても十分な効果が得られることがわかれば，塗装除去の工程も省略することができるため，維持管理に掛かる時間やコストはより縮減される．

デッキ母材に進展したき裂に対しては，第5章によりストップホールが十分な効果を有していることが明らかとなったため，従来と変わらずストップホールを施工することを提案する．ここで提案する補修方法を図5-15にまとめる．

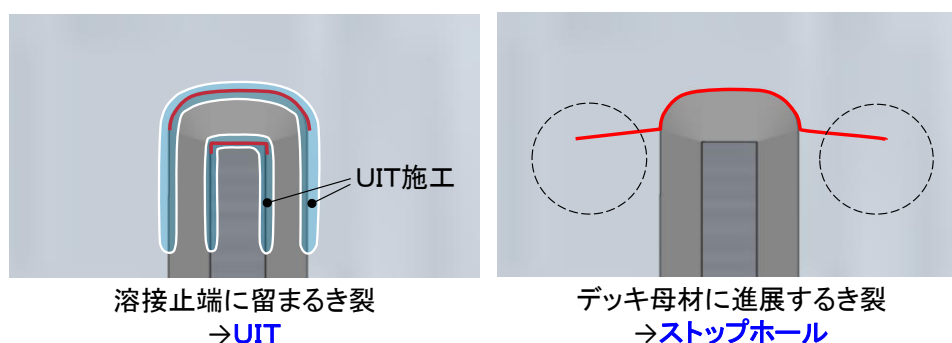


図 5-15 垂直スチフナ上端部の疲労き裂に対する従来の補修方法

5.3.3 UIT の施工手順と施工管理方法

UIT の打撃間隔が圧縮残留応力分布に与える影響を弾塑性 FEM 解析により検討した。解析モデルは図 5-16 に示す T 継手の 1/2 モデルで、溶接線の中央付近に UIT を模擬した荷重を与えた。荷重は、剛体のピンとモデルの接触面にペナルティ法による接触条件を与えたうえで、ピンに強制変位を与えることで UIT を模擬した。すなわち、STEP1 でピンを押し込み、STEP2 でモデルと離れるまでピンを引き戻して、その後の残留応力を調べた。ピンの変位方向は鉛直から 25°傾けた方向とし、鉛直方向に 0.4mm 移動するまで変位を与えた。着目部の要素寸法は 0.4mm である。ピンの形状や材料の機械的性質は 4.4.3 節と同じである。

図 5-17 に打撃間隔 2.8mm で 5 回の打撃を与えた場合と打撃間隔 0.4mm で 15 回の打撃を与えた場合の溶接止端直下の断面の溶接線直交方向の残留応力分布を示す。打撃間隔 2.8mm では打撃の境界部に圧縮残留応力が低い部分が生じているが、打撃間隔を密にすることで圧縮残留応力が一様となっている。なお、解析では左のピンから深さ 0.4mm の载荷・除荷を行い、順次隣のピンの载荷・除荷を行うことで凹みを形成しているが、実際には超音波振動させたピンを溶接止端に沿って動かしながら、相当数の打撃を与えることで凹みが形成される。そのため、解析結果において表面付近で生じているような溶接線方向の変形は実際には生じにくいと考えられる。

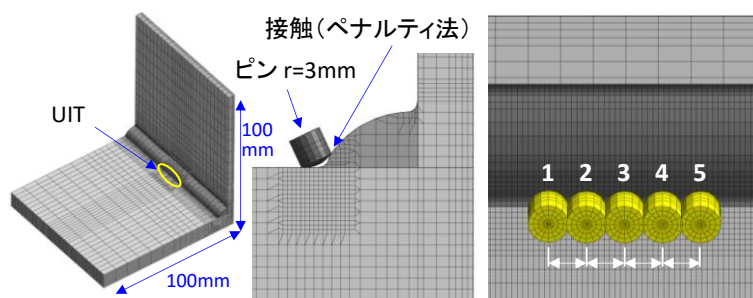


図 5-16 UIT の打撃間隔が圧縮残留応力分布に及ぼす影響を検討する解析モデル

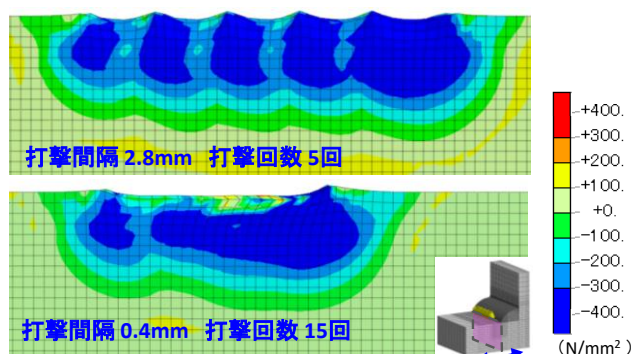


図 5-17 打撃間隔 2.8mm と 0.4mm の残留応力分布の比較

これまでの結果を踏まえて、UIT の施工手順と施工範囲を図 5-18 に示す。UIT の施工範囲は、第 3 章の実験では回し溶接とそこから 50mm の範囲としたが、き裂が溶接止端に沿ってウェブ方向に長く進展していることも稀であることから 20mm 程度で十分と考えた。UIT 施工の管理は打撃後の凹み深さとそのばらつきがないか（密に打撃できているか）をチェックすることで行う。凹み深さは第 3 章の検討で、比較的深いき裂が広がっていても停留させることができた 7L を参考に 0.25mm 程度とする。

【UIT 施工手順】

- ① 塗装の除去
- ② UIT 施工
- ③ ワイヤブラシで削りくずを除去
- ④ 複数個所で凹み深さを測定（深さ管理値：0.25mm 程度）
- ⑤ 凹み深さにばらつきがないことを確認（密に打撃できているか）
- ⑥ 塗装の復旧

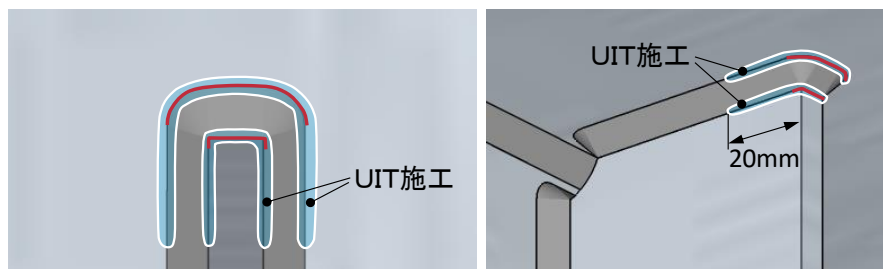


図 5-18 UIT の施工手順と施工範囲

5.3.4 ストップホールの施工手順と施工管理方法

ストップホールの施工手順と施工位置を図 5-19 に示す。まず、ストップホールの施工位置を決めるために磁粉探傷試験を行い、き裂先端位置を把握する。垂直スチーフナ上端部のき裂は、デッキ板厚方向には橋軸直角方向に曲がりながら進展することが知られている[10-12]。図 5-20 には、デッキ側止端から生じたき裂の疲労破面の一例を示す。そのため、図 5-19 に示すように、ストップホールはデッキ上面に生じるき裂の先端が除去できるよう、デッキ下面で確認できるき裂の先端よりもウェブ側に寄せた位置に施工する。ストップホールを施工した後は磁粉探傷試験を行いき裂の先端が捉えられているかを確認する。図 5-21 には、垂直スチーフナ側止端から進展するき裂の先端が捉えられなかった例を示す。き裂の先端が捉えられない場合には、ストップホールの拡大等の追加処置によりき裂の先端を捉える必要がある。

ストップホールの施工は通常デッキ下面側から行う。第 4 章の検討結果より、疲労耐久性を高めるためにストップホール壁は#80 以上に仕上げることにしているが、面取り量を変えてもストップホール壁の最大応力はほぼ変化しないことから、ストップホールの上下縁部にはバリ取り程度の面取りを施せばよいとしている。そのため、下面側からの作業のみでも仕上げの品質はある程度確保できると考えられる。しかし、

下面側からの作業でどの程度の仕上げができるか、また、下面側から十分な止水対策を行うことができるかについては、施工試験などにより検討する必要がある。そのため、図 5-19 に示す施工手順では、ストップホールに対してより恒久的な効果を期待するために、下面側からストップホールと応急的な止水対策を施工した後、デッキ上面側からも仕上げと確実な止水対策を行うこととしている。なお、ストップホールの仕上げ作業では、必ず触診により仕上げ残しがないこと確認しなければならない。

【ストップホールの施工手順】

STEP1：デッキ下面側からの施工

- ①塗装の除去
- ②磁粉探傷試験でのき裂先端確認
- ③ストップホール施工
- ④磁粉探傷試験でき裂先端が除去あるいは捉えられることを確認
- ④デッキ下面側からのストップホール壁の面取り・仕上げ
(面取りはバリ取り程度、仕上げは#80 以上)
- ⑤デッキ下面側から応急的な止水対策
- ⑥塗装の復旧

STEP2：デッキ上面側からの施工

- ①舗装の撤去
- ②デッキ上面側からのストップホール壁の面取り・仕上げ
(面取りはバリ取り程度、仕上げは#80 以上)
- ③孔壁への錆止め剤の塗布
- ④デッキ上面側から止水対策
- ⑤舗装の復旧

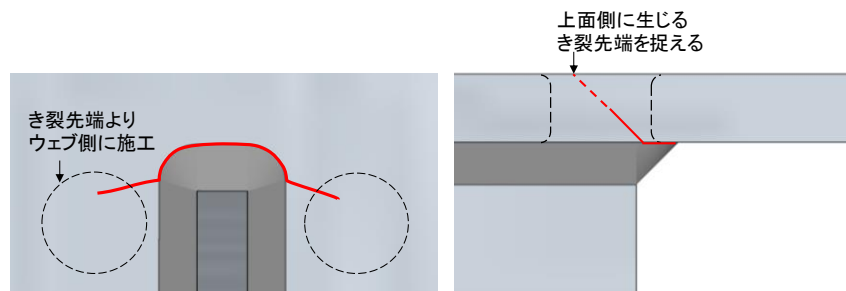


図 5-19 ストップホールの施工手順と施工位置



図 5-20 デッキ側止端から発生した疲労破面の例

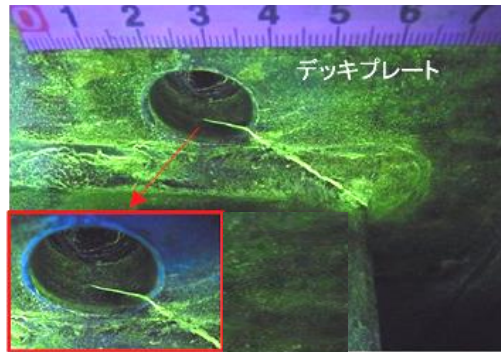


図 5-21 き裂の先端が捉えられなかったストップホールの例

5.4 まとめ

本章では，垂直スチフナ上端溶接部に疲労き裂が発生している実橋モデルと，第2章～第4章の検討に用いた試験体モデルの FEM 解析結果を比較することで，小型試験体の疲労試験が実橋の載荷条件やそれに伴う応力性状をどの程度再現できているかを検討した．さらに，これまでに得られた結果を基に，垂直スチフナ上端溶接部に対する効率的な補修方法を提案した．ここで得られた結果は以下の通りである．

- (1) 実橋モデルにおいて，春・秋の舗装剛性で 37.5ton，夏の舗装剛性で 25ton 程度の車両が載荷された際に生じる最大応力が試験体の疲労試験で再現されており，第2章～第4章の検討が，実橋に生じる厳しい応力性状のもとで行われていたことを確かめた．
- (2) 垂直スチフナ上端溶接部に生じるき裂の効率的かつ効果的な補修方法として，き裂の先端が溶接止端に留まる段階では UIT，デッキ母材まで進展している段階ではストップホールを施工することを提案し，それらの施工手順を示した．
- (3) 輪位置近傍に複数存在する垂直スチフナ上端部にき裂が生じ始めた段階で UIT を予防保全的に適用することで，維持管理に必要な時間やコストの縮減が期待できる．
- (4) UIT では，打撃深さとそのバラつきを適切に管理することで高い効果が得られると考える．
- (5) ストップホールでは，孔壁に対してバリ取り程度の面取りと #80 以上の仕上げを行うことで高い効果が得られると考える．

【参考文献】

- [1] 井口進，内田大介，川畑篤敬，玉越隆史：アスファルト舗装の損傷が鋼床版の局部応力性状に与える影響，鋼構造論文集，Vol.15，No.59，pp.75-86，2008.
- [2] 日本道路協会：舗装設計便覧，2006.
- [3] 吉川直志，伊藤昇，大塚敬三，町田文孝，三木千寿：Uリブを用いた鋼床版の疲労損傷事例，土木学会第57回年次学術講演会，I-277，2002.
- [4] 神木剛，町田文孝，下里哲弘，澁谷敦，増井隆，弓削太郎：鋼床版の疲労き裂発生パターンに関する一分析，土木学会第59回年次学術講演会，I-544，2004.
- [5] 神木剛，下里哲弘，弓削太郎：鋼床版箱桁ウェブの垂直補剛材溶接部の疲労き裂対策検討，土木学会第60回年次学術講演会，I-398，2005.
- [6] 平林泰明，牛越裕幸，木ノ本剛：首都高速道路における鋼床版疲労損傷，鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，Vol.10，pp.39-53，2007.
- [7] 高田佳彦，平野敏彦，坂野昌弘：阪神高速道路における鋼床版の疲労損傷状況報告，土木学会第61回年次学術講演会，I-535，2006.
- [8] 堀江佳平，高田佳彦：阪神高速道路の鋼床版疲労損傷の現状と取組み，鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，Vol.10，pp.55-69，2007.
- [9] 山田健太郎：重交通下における鋼床版の疲労損傷－名古屋周辺での事例－，鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，Vol.10，pp.11-18，2007.
- [10] 森猛，原田英明，大住圭太，平山繁幸：鋼床版垂直スティフナ溶接部に生じる疲労き裂の補修・補強方法，鋼構造論文集，Vol.18，No.69，pp.51-69，2011.
- [11] 山田健太郎，小藺江朋亮，小塩達也：垂直補剛材と鋼床版デッキプレートのすみ肉溶接の曲げ疲労試験，鋼構造論文集，Vol.14，No.55，pp.1-8，2007.
- [12] 渡辺直起，山田聡，山田健太郎，中村桂久，高木達弘：鋼床版デッキプレートと垂直補剛材溶接部の疲労強度と補修工法の効果，トピー鉄構技報，No.23，pp.14-22，2007.

第 6 章 結論

本研究では、鋼床版に数多く発生している垂直スティブナ上端溶接部の疲労き裂の補修方法を検討するために不可欠と考えられるき裂の発生・進展性状について検討したうえで、効率的かつ効果的な補修方法について検討した。き裂の進展性状および従来の調査手順や補修方法等を考慮し、補修方法としてはき裂の先端が溶接止端に留まる段階ではき裂に超音波ピーニング (UIT)、デッキ母材まで進展した段階では、従来から適用されているストップホールが簡易かつ効率的と考え、それらの効果と実橋に適用する上での手順や配慮すべき事項をまとめた。

各章で得られた結果は以下のとおりである。

第 2 章 疲労き裂の発生起点と進展挙動の検討

第 2 章では、実橋で発生しているき裂の再現と、それらのき裂の発生・進展性状を明らかにすることを目的に、小型試験体を対象に溶接の形状・寸法とルートギャップをパラメータとした疲労試験と FEM 解析を行った。ここで得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 小型試験体の疲労試験を行い、実橋で報告されている疲労き裂を再現した。ただし、垂直スティブナ側止端から発生してデッキに進展するタイプのき裂は、溶接部を斜め上方に 2mm 程度進展した後に停留した。
- (2) 溶接のままの試験体では、試験開始直後にデッキ側とスティブナ側止端にき裂が生じる。その後、デッキ側に発生したき裂は深さ方向に荷重繰返し数とほぼ比例して進展し、深さが 8mm 程度以上になると停留する傾向が認められた。スティブナ側溶接止端のき裂もある程度進展すると停留した。
- (3) スティブナこば面の溶接止端には高い応力集中が生じるものの、こば面から離れるにしたがって応力は急激に低下し、こば面から橋軸直角方向へ 25mm 程度離れると応力はほぼ 0 となる。スティブナ側溶接止端のき裂がある程度進展した後に停留した原因の一つに、このような応力分布が考えられる。
- (4) デッキ側止端の曲率半径を 5mm 以上で仕上げることで、溶接のままに比べて応力は半減し、スティブナ側止端も 5mm 程度で仕上げることで約 75%程度まで低減する。このことから止端を仕上げることで疲労耐久性の大幅な向上が期待できる。ただし、溶接サイズが極端に小さい場合には仕上げの効果は小さく、特にスティブナ側では仕上げた止端の応力が溶接のままの状態よりも大きくなることもある。

- (5) 溶接ルート部の応力はのど厚が小さいほど高くなり，溶接形状によらずその応力はのど厚で整理できる．
- (6) 溶接ルート部が疲労破壊の起点となるのは，溶接脚長が小さく，ルートギャップが大きい，すなわち溶接ののど厚が極端に小さい場合である可能性を示した．通常の溶接の大きさおよびルートギャップであれば，溶接止端が疲労破壊起点となることを有効切欠き応力の概念を用いて示した．

第 3 章 溶接止端に留まるき裂に対する UIT の効果

第 3 章では，先端がデッキ側溶接止端に留まる段階のき裂を対象に，UIT を施工する補修効果について，小型試験体の疲労試験を行うことにより検討した．ここで得られた結果は以下のとおりである．

- (1) 溶接のままで UIT を施工することで，デッキ側止端き裂の発生が防止できた．ルートき裂が発生・進展したが，その進展は十分に遅く，UIT の施工により疲労耐久性は大幅に向上した．
- (2) 深さ 4mm 程度以下のデッキ側止端のき裂に対して UIT を施工することで，12 個所中 11 個所のき裂が停留した．そのうち 10 個所でルートき裂が発生・進展したが，その進展は遅く，UIT の高い補修効果が確認された．UIT による高い補修効果を確実とするためには，UIT による凹み深さの管理が重要であることを示した．
- (3) デッキ側止端のき裂が進展したのは，き裂深さが 4mm と深く，UIT 施工後の打撃深さが比較的浅い 1 個所のみであった．その進展速度は溶接のままに比べて遅かった．
- (4) デッキ側止端のき裂が深くなることでルート部先端の応力が減少する．UIT を施工した試験体では，止端き裂が停留したことでルート部先端の応力が高いままとなり，き裂が発生・進展したと考えられる．

第 4 章 デッキプレート母材に進展したき裂に対するストップホールの効果

第 4 章では、先端がデッキ母材まで進展しているき裂に対するストップホールの効果を明らかにするため、小型試験体の疲労試験と応力解析を行った。また、ストップホール法で補修した場合の疲労耐久性評価を行うための疲労強度曲線について検討した。ここで得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 疲労き裂をストップホールで補修した小型試験体の疲労試験を行い、デッキに進展した疲労き裂に対して、ストップホール法が高い補修効果を有することを確かめた。
- (2) 鋼床版垂直スチフナ溶接部の疲労き裂先端に設けたストップホールの面取りを施しても、応力集中係数の低減効果はない。また、ストップホールの径を大きくすることによる応力低減効果の改善もさほど大きなものではない。
- (3) デッキプレート未貫通き裂に対してストップホール補修を行うことで、デッキ下面から生じた疲労き裂の進展およびデッキ上面からのき裂の発生は早まる。
- (4) 既往の疲労試験結果を整理することで、孔壁仕上げなしおよび孔壁を仕上げたストップホールで補修した部材の疲労耐久性を評価するための疲労強度曲線を提案した。また、実験データと比較することでその有効性を確かめた。

第 5 章 実橋への適用性の検討

第 5 章では、垂直スチフナ上端溶接部に疲労き裂が発生している橋梁を対象とした実橋モデルと、第 2 章～第 4 章の検討に用いた試験体モデルの FEM 解析結果を比較することで、小型試験体の疲労試験が実橋の載荷条件やそれに伴う応力性状をどの程度再現できているかを検討した。さらに、これまでに得られた結果を基に、垂直スチフナ上端溶接部に対する効率的かつ効果的な補修方法を提案した。ここで得られた結果は以下の通りである。

- (1) 実橋モデルにおいて、春・秋の舗装剛性で 37.5ton、夏の舗装剛性で 25ton 程度の車両が載荷された際に生じる最大応力が試験体の疲労試験で再現されており、第 2 章～第 4 章の検討が、実橋に生じる厳しい応力性状のもとで行われていたことを確かめた。

- (2) 垂直スチフナ上端溶接部に生じるき裂の効率的かつ効果的な補修方法として、き裂の先端が溶接止端に留まる段階では UIT，デッキ母材まで進展している段階ではストップホールを施工することを提案し、それらの施工手順を示した。
- (3) 輪位置近傍に複数存在する垂直スチフナ上端溶接部に疲労き裂が生じ始めた段階で UIT を予防保全的に適用することで、維持管理に必要なコストや時間の縮減が期待できる。
- (4) UIT では、打撃深さとそのバラつきを適切に管理することで高い効果が得られると考えられる。
- (5) ストップホールでは、孔壁に対してバリ取り程度の面取りと#80 以上の仕上げを行うことで高い効果が得られると考えられる。

以上のように、鋼床版垂直スチフナ溶接部の効率的かつ効果的な補修方法として、き裂の先端が溶接止端に留まる段階では UIT，デッキ母材まで進展している段階ではストップホールを施工することが有効であることを示した。今後は、実橋への適用に向けた課題の整理・検討を行うのとともに、実橋を想定した適用試験等により、維持管理に要するコストや時間を縮減するための、より適切な工程や施工時の留意点等を整理していく必要がある。

謝辞

指導教員である法政大学デザイン工学部都市環境デザイン工学科の森猛教授には、学部から修士にかけての3年間および社会人として博士後期課程に入学してからの3年間の計6年間に渡り、研究に関して懇切丁寧なご指導を賜りました。また、再入学するまでの6年間も含め、研究以外においても折々で貴重なご助言を頂き、様々な場面で私の助けとなっております。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

副査をお引き受けいただきました法政大学デザイン工学部都市環境デザイン工学科の溝渕利明教授，藤山知加子准教授，芝浦工業大学工学部土木工学科の穴見健吾教授には、的確なご指摘・ご助言を多く頂きました。心より感謝申し上げます。

新日鐵住金(株)の島貫広志氏には UIT の施工についてご指導を頂き、その他にも多くのご助言を頂きました。首都高速道路(株)の御嶽讓氏には、損傷事例の掲載についてご快諾頂きました。 (株)東京鐵骨橋梁の田中雅人氏，入部孝夫氏，山田浩二氏，細見直史氏をはじめとする技術研究所の皆様には試験体の製作などでご協力を頂き、温かい励ましの言葉を頂きました。ここに記して深く感謝いたします。また、(株)東京鐵骨橋梁の柳沼安俊氏には、多くのことを教えていただいたのと同時に、博士課程への入学に際して、強く背中を押していただきました。心より御礼を申し上げるとともに、改めてご冥福をお祈りいたします。

本研究は法政大学の卒業論文および修士論文として行われてきたもので、第2章は長田樹氏，第3章，第4章は阪間大介氏，阿部智正氏に多大なご協力をいただきました。深く感謝いたします。法政大学都市環境デザイン工学科専任講師の小林祐規先生，技術嘱託の松岡正浩氏，田中義久氏には、手間の掛かる実験作業などにご助力を頂きました。法政大学鋼構造研究室卒業生の内田大介氏，平山繁幸氏，原田英明氏には解析や実験に関する的確なご助言や激励のお言葉をいただきました。同時期に社会人で通学していた一宮充氏，谷口哲憲氏，山崎信宏氏，網谷岳夫氏には多くの励ましの言葉を頂くのと同時に、様々なお力添えを頂きました。さらに、ここに書き記していない研究室卒業生の皆様，同時期に在学していた学生諸氏にもたくさんの温かいお言葉を頂きました。心より御礼申し上げます。

在学中は、私が勤務する(一財)首都高速道路技術センターに多大なるご支援を頂きました。入学に際しては、当時の北川久理事長，山下寛理事，青木敬幸部長（現：青木あすなろ建設(株)），小西拓洋室長（現：東京都市大学）にご協力をいただきました。在学中は、鈴木剋之理事長をはじめとする皆様に多くのお力添えと激励のお言葉を頂きました。特に、時田英夫参与，若林登部長，村野益巳課長・仲野孝洋担当課長をはじめとする鋼構造技術課の皆様，臼井恒夫課長（現：首都高速道路(株)）・深山大介課長・関口博司担当課長をはじめとする企画課の皆様には、貴重なご助言と多くのご配慮を頂きました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。今後の会社の発展に少しでも貢献できるよう、尽力させていただく所存です。

最後に、これまで支えて頂いた家族・友人，温かい言葉を掛けていただいた皆様，お気に掛けていただいた皆様に心から感謝申し上げます。